

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour obtenir le grade de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Jean-Jacques LION

Ingénieur I.S.I.N.

SUJET :

**DÉTERMINATION ET CONTRÔLE AUTOMATIQUES DU POIDS
DE SANG EN CIRCULATION EXTRACORPORELLE**

Soutenue publiquement le

1972 devant la Commission d'examen

Membres du Jury

Président : M. R. GUILLIEN

Examineurs : MM. R. HUSSON

R. MAINARD

R. MARI

Invités : MM. P. CHALNOT

R. FRISCH

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour obtenir le grade de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Jean-Jacques LION

Ingénieur I.S.I.N.

SUJET :

**DÉTERMINATION ET CONTRÔLE AUTOMATIQUES DU POIDS
DE SANG EN CIRCULATION EXTRACORPORELLE**

Soutenue publiquement le 1972 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury

Président : M. R. GUILLIEN

Examineurs : MM. R. HUSSON

R. MAINARD

R. MARI

Invités : MM. P. CHALNOT

R. FRISCH

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

pour obtenir le grade de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Jean-Jacques LION

Ingénieur I.S.T.N.



DETERMINATION ET CONTRÔLE AUTOMATIQUE DU POIDS
DE SANG EN CIRCULATION EXTRACORPORELLE

1975 devant la Commission d'examen

Soutenue publiquement le

Membres du jury

Président : M. R. CULLIEN
Examinateurs : MM. R. HUSSON
R. MAINARD
R. MARÉ
Invités : MM. P. CHALNOT
R. FRISCH

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué à l'Institut de Génie Biologique et Médical, dans les locaux de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur.

Avant d'en aborder l'exposé, nous voudrions exprimer nos remerciements à tous ceux qui ont facilité notre tâche et ont permis de la mener à bien, tant parmi les médecins que parmi les physiciens.

Notre reconnaissance s'adresse à Monsieur le Professeur FRISCH, Chirurgien à l'Hôpital Central de Nancy qui nous a confié le sujet de cette recherche. Ses compétences scientifiques et médicales, la sollicitude qu'il a toujours témoignée, nous ont beaucoup encouragés.

Que Monsieur le Professeur GUILLIEN, Fondateur et Directeur de l'Institut de Génie Biologique et Médical, trouve ici le témoignage de notre gratitude. Nous avons pu apprécier sa bienveillante autorité, les conseils avertis qu'il nous a prodigués, le grand intérêt qu'il n'a cessé d'apporter à ce travail.

Nous avons une pensée particulière pour Monsieur le Professeur MARI, Directeur de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur qui a assuré notre formation d'ingénieur dans les meilleures conditions. Sa rigueur scientifique, la clarté de son enseignement permettaient toujours un travail efficace.

Nous remercions tout particulièrement Messieurs les Professeurs CHALNOT, FRISCH, HUSSON, MAINARD et MARI d'avoir bien voulu accepter de faire partie de notre jury.

Nous adressons de vifs remerciements à Monsieur E. YVROUD, Directeur Technique de l'I.G.B.M. Il a grandement contribué à faciliter notre travail, à le planifier, en ne mesurant ni son temps, ni sa peine.

Que Messieurs les Professeurs DURAND et MAINARD, que Monsieur POIRSON acceptent notre respectueuse reconnaissance pour l'aide matérielle qu'ils nous ont apportée.

Nous tenons à exprimer à notre collègue Monsieur Claude DELACOTE notre reconnaissance et notre amitié née de l'excellente collaboration et du parfait climat dans lequel se déroulèrent nos recherches.

Nous félicitons Monsieur HENRY, technicien à l'I.G.B.M. qui par la qualité de son travail a facilité la réalisation de l'expérimentation.

Nous voudrions aussi remercier le personnel du secrétariat compétent et serviable qui s'est chargé de la dactylographie et du tirage de ce mémoire.

AVANT-PROPOS

I - <u>INTRODUCTION</u>	1.
A - <u>Circulation extracorporelle</u>	1.
B - <u>Contrôle du volume sanguin extracorporel</u>	1.
C - <u>Description d'un oxygénateur à disques</u>	2.
II - <u>TRAVAUX ANTERIEURS : METHODE PROPOSEE</u>	
A - <u>Repérages de niveau. Mesures de pression statique dans l'oxygénateur</u>	3.
B - <u>Pesée d'un oxygénateur à sac plastique</u>	3.
C - <u>Miniaturisation de l'unité de perfusion</u>	3.
D - <u>Méthode proposée</u>	4.
III - <u>DIAGRAMME DE PESEE</u>	
A - <u>Ressorts liés à un capteur de déplacement</u>	5.
1) <u>ressorts de compression</u>	
2) <u>ressorts de traction</u>	
B - <u>Plateau de balance lié à un capteur de déplacement</u>	5.
C - <u>Lames liées à des jauges de contraintes - Choix de la méthode</u>	5.
IV - <u>APPAREILLAGE</u>	
A - <u>Chaîne de mesure</u>	7.
1) <u>Signal de sortie de la diagonale d'un pont de Wheatstone constitué par quatre jauges actives. Exploration du signal.</u>	7.
a) <u>Une seule résistance R varie de ΔR</u>	7.
b) <u>Les quatre résistances R_i varient de ΔR_i</u>	8.
c) <u>Variations capacitives</u>	10.
2) <u>Rappel du principe de fonctionnement d'une chaîne de mesure à fréquence porteuse. Application au pont PHILIPS PR9307</u>	11.
a) <u>généralités</u>	
b) <u>Les ponts à courant porteur alternatif</u>	
c) <u>Application au pont PHILIPS PR9307</u>	14.
3) <u>Autres solutions</u>	14.

B - <u>Corps d'épreuve</u>	15.
1) <u>Définitions préliminaires</u>	16.
2) <u>Caractéristiques mécaniques du corps d'épreuve</u>	16.
3) <u>Choix du corps d'épreuve</u>	16.
a) <i>Forme</i>	17.
b) <i>dimensions</i>	17.
c) <i>Métal du corps d'épreuve</i>	23.
d) <i>Mesures de flèches d'un corps d'épreuve par un capteur de déplacement.</i>	27.
4) <u>Vibrations des lames - Filtrage</u>	29.
a) <i>fréquence propre d'une lame triangulaire</i>	29.
b) <i>fréquences de vibrations d'une lame en fonction des masses appliquées</i>	30.
c) <i>Fréquence propre du corps d'épreuve</i>	31.
d) <i>Valeurs expérimentales</i>	32.
e) <i>Vibrations forcées</i>	34.
f) <i>Atténuation mécanique de l'amplitude des vibrations</i>	34.
g) <i>Filtrage électrique des vibrations</i>	35.
C - <u>Liaisons des corps d'épreuve à l'oxygénéateur</u>	36.
1) <u>Plateau, berceau, plaque d'appui, bille</u>	36.
2) <u>Positionnement des billes au sommet de la plaque triangulaire</u>	37.
3) <u>Déplacement de (d) vers l'encastrement</u>	39.
D - <u>Jauges</u>	
1) <u>Caractéristiques des jauges utilisées</u>	40.
2) <u>Fixation des jauges sur le corps d'épreuve</u>	42.
3) <u>Compensations des dérives introduites par des variations de température sur les montages en pont de jauge sans charge</u>	43.
a) <i>Etude théorique</i>	44.
b) <i>Intérêt du résultat</i>	44.
c) <i>Nécessité d'utiliser des jauges compensées</i>	46.
d) <i>Détermination expérimentale des valeurs des dérives</i>	46.

E - <u>Montage des trois capteurs</u>	
1) <u>Association des jauges</u>	51
a) <i>Montage à trois capteurs indépendants</i>	51
b) <i>Montage en série ou en parallèle</i>	52.
2) <u>Ajustage des sensibilités</u>	54.
3) <u>Compensation de la variation de sensibilité</u>	55.
 V - <u>ESSAIS CLINIQUES, RESULTATS GLOBAUX</u>	57.
 VI - <u>ASSERVISSEMENT</u>	59
 VII - <u>CONCLUSION</u>	61.

I - INTRODUCTION

A - Circulation extracorporelle (fig. 1)

Pour effectuer des interventions chirurgicales à l'intérieur du coeur, il faut assécher les cavités cardiaques et assurer pendant ce temps la survie du patient.

Pour cela, on dérive par des canules placées dans les veines caves le sang veineux arrivant normalement au coeur.

On réinjecte dans l'aorte, par l'artère fémorale, le sang oxygéné.

Ce mode d'assèchement met hors circuit les circulations cardiaque et pulmonaire. Il impose que cette dérivation comporte :

- une pompe à galets effectuant le travail du coeur et un oxygénateur celui des poumons,
- des filtres et un échangeur de température,
- des pompes annexes pour aspirer le sang de la circulation coronaire revenant dans les cavités cardiaques.

B - Contrôle du volume sanguin extracorporel

L'organisme est excessivement sensible à de très faibles variations de la volémie¹. La masse sanguine circulant dans les vaisseaux du patient doit donc être maintenue strictement constante.

La masse totale de sang contenue dans le patient et dans l'ensemble extracorporel est constante pendant l'intervention.

Le circuit extracorporel comprend, à ce point de vue, une partie à contenu invariable constituée par les pompes, tubes, filtre et échangeur, et l'oxygénateur dont le contenu peut varier.

Les variations de masse de sang dans l'oxygénateur reproduiront au signe près les variations de masse de sang de l'opéré.

La surveillance de la quantité de sang dans l'organisme se résume donc à la surveillance du contenu de l'oxygénateur.

On peut résorber tout écart en ajustant le débit de la pompe artérielle.

SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CEC

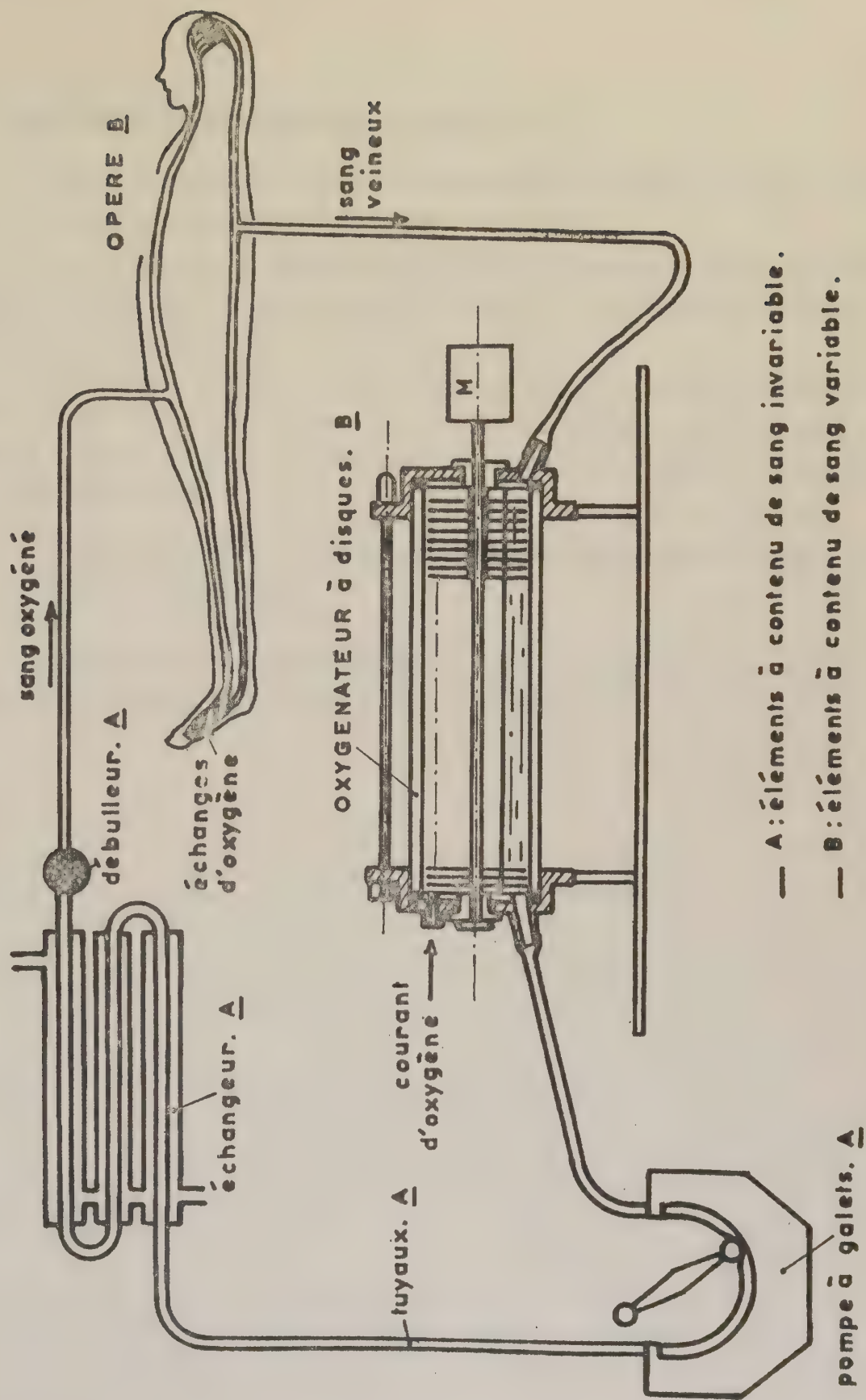


FIG 1

- A: éléments à contenu de sang invariable.
- B: éléments à contenu de sang variable.

C - DESCRIPTION DE L'OXYGENATEUR A DISQUES (fig. 1)

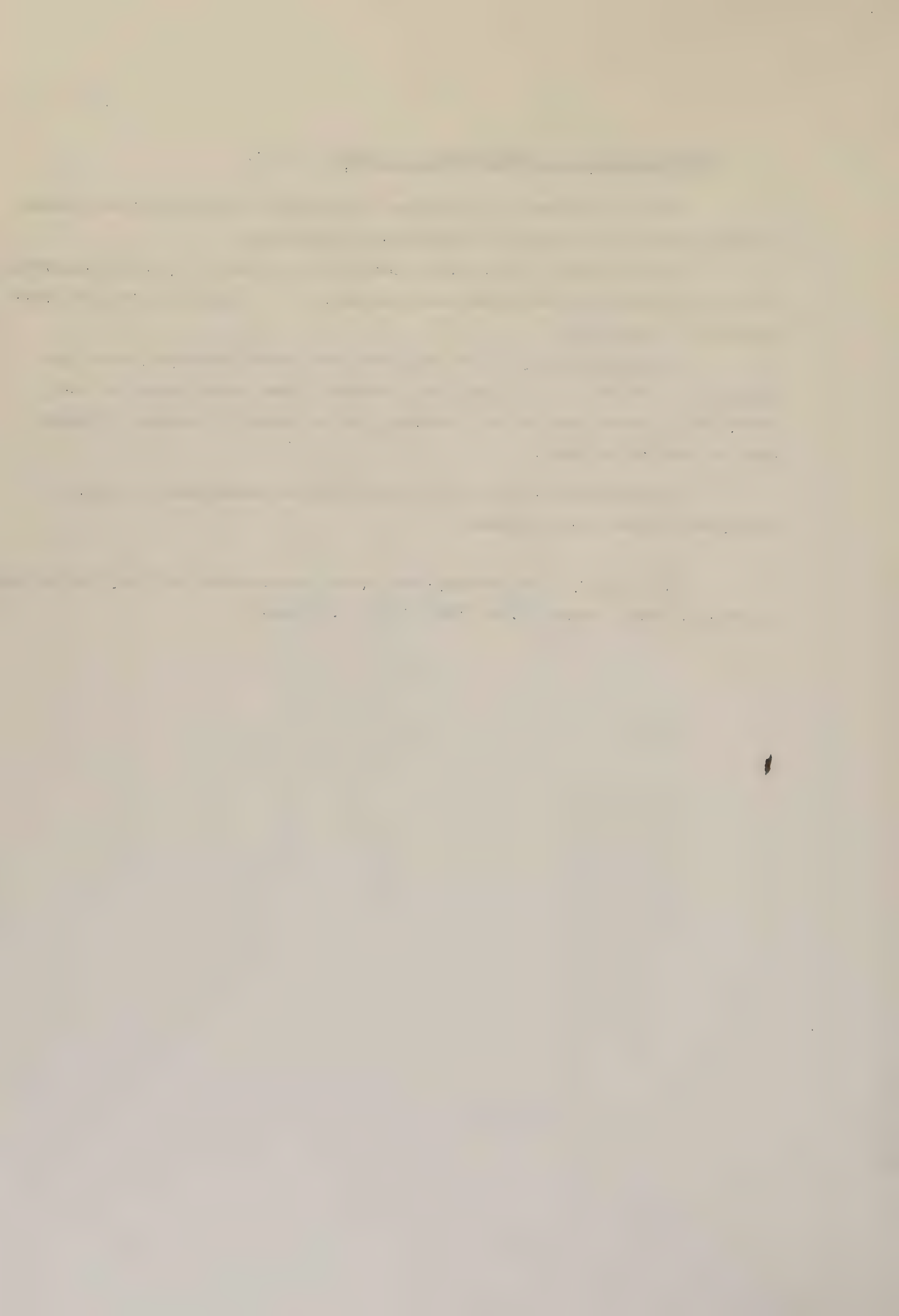
C'est un réservoir cylindrique horizontal en pyrex siliconé, fermé par deux plaques métalliques qui assurent l'étanchéité.

En son centre, un axe porte une série de disques en acier inoxyuable ; il tourne entraîné par un moteur monté en porte - à - faux sur l'une des deux plaques de l'extrémité.

Le cylindre contient du sang dans son tiers inférieur. Dans leur mouvement de rotation, les disques se couvrent d'une mince couche de sang renouvelée à chaque révolution, oxygénée par le courant d'oxygène circulant dans le haut du cylindre.

Le chirurgien utilise un cylindre plus ou moins long et adapte le nombre de disques correspondant.

Le poids de l'oxygénateur vide varie alors entre 197 N et 256 N, avec le sang, il varie entre 213 et 290 N (21,3 et 29 kgf)



II - TRAVAUX ANTERIEURS METHODE PROPOSEE

A - Repérages de niveaux, mesures de pression statique dans l'oxygénéateur

La plupart des solutions étudiées pour surveiller la quantité de sang dans l'organisme, donc le contenu de l'oxygénéateur, se résument à des mesures de niveaux ² ou à la mesure de la pression exercée par une colonne de sang de hauteur variable. ³ (AGA Heart lung machine).

Les formes irrégulières des oxygénateurs ne permettent pas de relier simplement les variations de niveaux aux variations de volume ; or, à certains moments et temporairement, le chirurgien peut avoir besoin de surcharger ou d'alléger la masse sanguine circulant dans le patient en connaissant les quantités déplacées.

Ces méthodes sont imprécises :

- du fait de la grande surface libre le repérage d'une faible dénivellation représentera une variation de volume importante.

- du fait du mouvement du sang d'amont en aval dans l'oxygénéateur et de la rotation des disques, la surface du sang n'est ni horizontale, ni plane.

B - Pesée d'un oxygénéateur "à sac plastique"

Le poids de l'oxygénéateur et du sang qu'il contient est environ de 50 N. Une pesée de l'ensemble a été réalisée en utilisant "un dynamomètre à jauge de traction" ⁴ avec une précision de $\pm 30 \cdot 10^{-2}$ N (± 30 gf)

C - Miniaturisation de l'unité coeur poumon artificiels

Les malformations cardiaques congénitales peuvent nécessiter une CEC chez les jeunes enfants, voire chez les nouveaux nés.

Les risques opératoires, élevés avec les moyens classiques ⁵ expliquent qu'on développe actuellement en laboratoire des unités compactes, miniaturisées, placées entièrement sur la table d'opération, à côté du patient ⁶.

- d'une part pour minimiser l'hémolyse en diminuant le temps de passage du sang dans les circuits extracorporels ainsi que les surfaces de contact du sang avec ces mêmes circuits.

- d'autre part pour réduire le volume de sang circulant en dehors de l'opéré.

On pourra ainsi repérer et corriger des variations plus faibles de ce volume traduites par des variations égales chez le malade.

Nous pensons qu'une pesée automatique de toute l'unité de perfusion pourrait en constituer un perfectionnement logique.

D - Méthode proposée

La solution la plus commode pour évaluer ces variations est la pesée de l'oxygénéateur et de son contenu. La mesure absolue du poids importe peu (sensiblement 280 N).

L'essentiel est de peser autour d'un zéro taré en début d'expérience, les variations dont l'amplitude maximale peut atteindre 35 N, dans une ambiance de vibrations entretenues par la rotation des disques et le débit pulsé de la pompe à galets.

La durée maximale du fonctionnement continu, sans refaire le zéro est de quatre heures.

Pour maintenir constante la masse sanguine dans l'organisme, il faut asservir la vitesse de rotation de la pompe aux variations mesurées, en fonctionnement automatique, tout en gardant la possibilité d'intervention manuelle sur le potentiomètre de commande de la vitesse de la pompe.

Ainsi le mécanisme ajouté ne modifie pas le fonctionnement antérieur, en fonctionnement manuel.

Si la pesée automatique conduit à une régulation à plus ou moins dix grammes, la précision est bonne et médiocre avec plus ou moins cinquante grammes.

III - DIAGRAMME DE PESEE

Le diagramme de la Figure 2 résume les solutions étudiées à chaque niveau.

A - Ressorts liés à un capteur de déplacement

Les caractéristiques du capteur sont indiquées au paragraphe (VB3d)

Il possède théoriquement un pouvoir de résolution infini.

Il permet de détecter pratiquement, avec le voltmètre qui lui est associé un déplacement de 3μ , qui doit correspondre selon notre hypothèse à une variation de poids de $10^{-2}N$, (10 gf)

1) Ressorts de compression

La table et l'oxygénateur suspendus sur quatre ressorts de compression dont le coefficient de raideur est 3300 N/m engendrent le flambage des ressorts. Nous n'obtenons aucune stabilité latérale de l'ensemble.

2) Ressorts de traction

Des ressorts en acier inoxydable, précontraints pour diminuer leur encombrement, travaillant à la traction pour éviter le flambage, portent la table et l'oxygénateur.

Un guide monté sur rotule et roulements à billes, fixé sous la table augmente la stabilité latérale.

La présence de ce guide crée des frottements parasites qui diminuent la précision attendue.

B - Plateau de balance lié à un capteur de déplacement

En utilisant une suspension de balance dont le plateau se déplace dans une seule direction verticale, on évite les difficultés rencontrées quand la table possède plusieurs degrés de liberté.

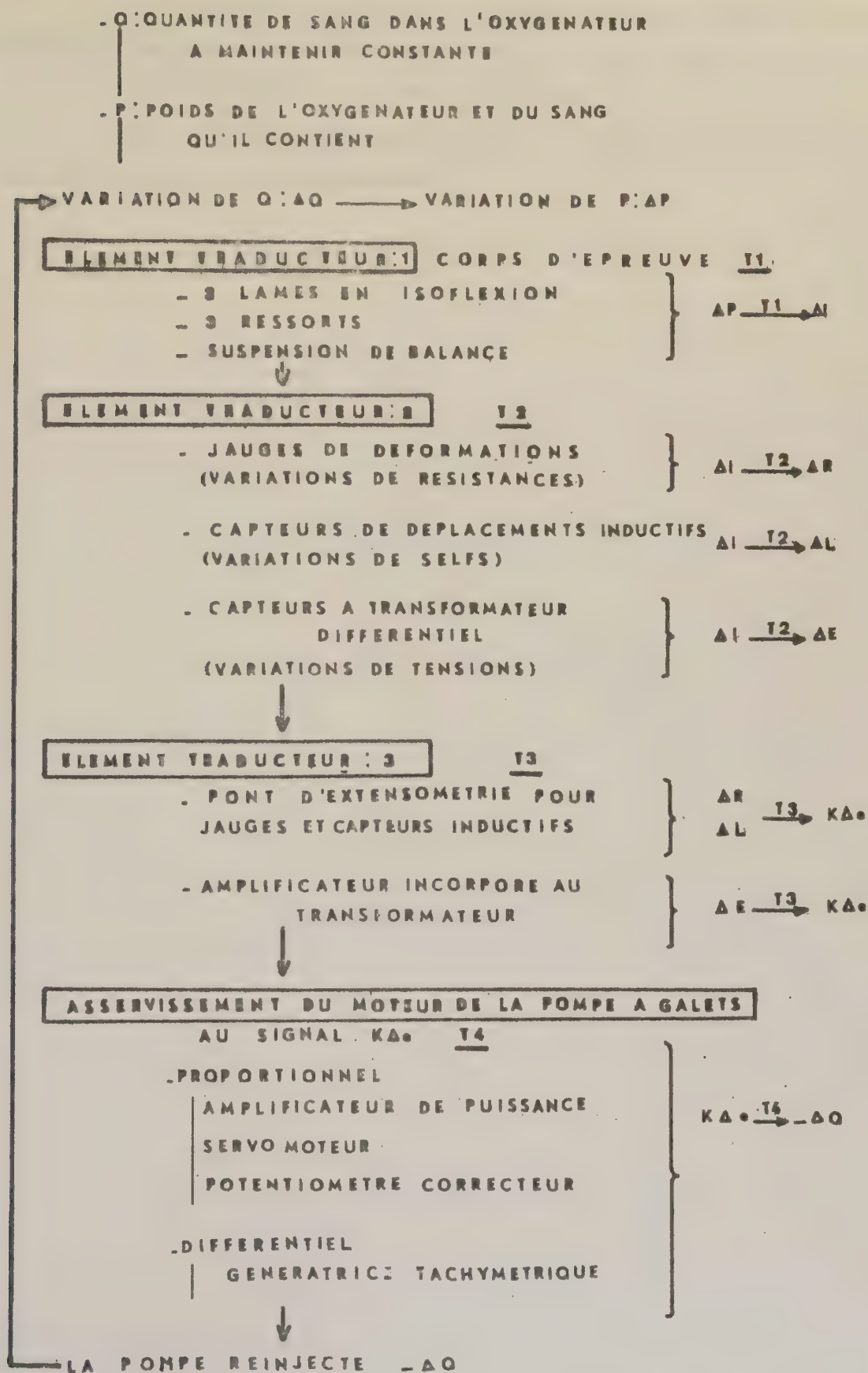
On peut associer les déplacements du capteur et du plateau.

C - lames liées à des jauges de contrainte : choix de la méthode

Le plateau supportant l'oxygénateur repose sur trois éléments déformables mais très rigides fixés au bâti au lieu d'être appliqué directement sur le bâti.

DIAGRAMME DE LA PESEE CONTINUE

FIG 2



Des jauges de déformations collées sur chaque élément sensible, câblées en pont de Wheatstone reproduisent par leurs variations de résistances, les variations de poids du sang dans l'oxygénateur.

Cette dernière méthode, est celle que nous avons choisie. Elle sera développée dans les pages suivantes.

IV - APPAREILLAGE

A - Chaîne de mesure

1) Signal de sortie de la diagonale d'un pont de Wheatstone constitué par quatre jauges actives. Exploitation du signal.

a) 1 seule résistance de valeur R varie de ΔR

$$\left| \begin{array}{l} R_2 = R_3 = R_4 = R \\ R_1 = R + \Delta R \end{array} \right.$$

Le calcul utilise le résultat suivant (théorème de Thévenin): lorsqu'on intercale une résistance entre 2 points A et B d'un réseau, ce réseau se comporte vis-à-vis de cette résistance comme une source de force électromotrice $E_o = (V_A - V_B)_{G = \infty}$ et de résistance interne R_{eq} , où R_{eq} est la résistance équivalente de l'ensemble du réseau (fig. 3)

$$\text{- calcul de } (V_A - V_B)_{G = \infty} : i_1 = \frac{E_v}{2R + \Delta R} \quad i_2 = \frac{E_v}{2R}$$

$$\begin{aligned} (V_A - V_B)_{G = \infty} &= R(i_2 - i_1) = R \left(\frac{E_v}{2R} - \frac{E_v}{2R + \Delta R} \right) = \frac{E_v}{2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \right) \\ &= \frac{E_v}{2} \frac{\frac{\Delta R}{2R}}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \end{aligned}$$

$$\Delta R \ll R \quad \text{donc} \quad \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} = 1 - \frac{\Delta R}{2R}$$

$$(V_A - V_B)_{G = \infty} \approx \frac{E_v}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R} \right)$$

- calcul de R_{eq} vue des bornes A et B :

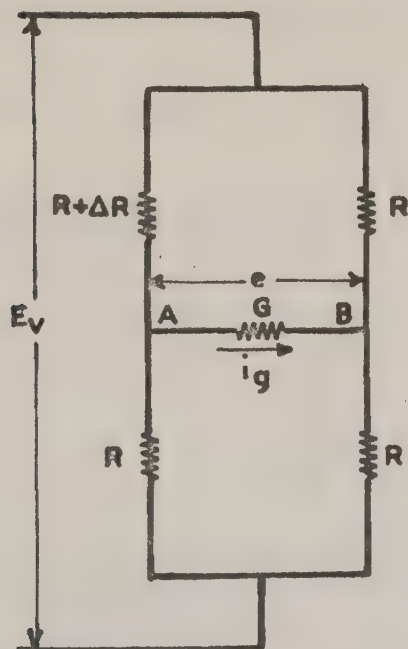
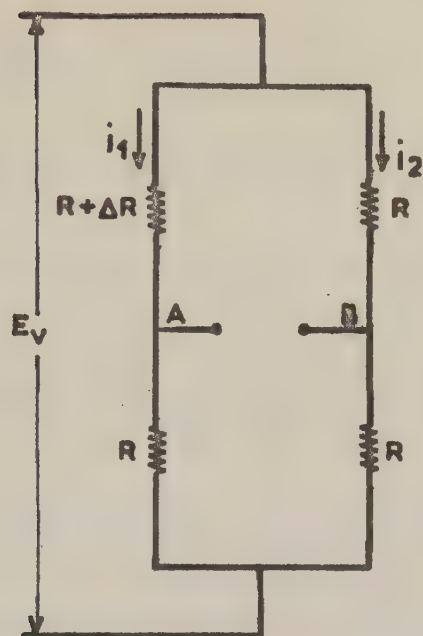
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R + \Delta R} \quad R_{eq} = \frac{2R(2R + \Delta R)}{4R + \Delta R} = R \frac{1 + \frac{\Delta R}{2R}}{1 + \frac{\Delta R}{4R}} \approx R \left(1 + \frac{\Delta R}{4R} \right) = R + \frac{\Delta R}{4}$$

- valeur du courant i_g et de la tension e dans la diagonale d'après le théorème de Thévenin

$$i = \frac{(V_A - V_B)}{Ri + G}$$

APPLICATION DU THEOREME DE THEVENIN AU PONT DE
WHEATSTONE CONSTITUE PAR QUATRE JAUGES.

FIG 3



$$i_g = \frac{E_v}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right) \frac{1}{R + \frac{\Delta R}{4} + G} = \frac{E_v}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right) \frac{1}{R+G} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{4(R+G)}}$$

$$i_g = \frac{E_v}{4(R+G)} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right) \left(1 - \frac{\Delta R}{4(R+G)}\right) = \frac{E_v}{4(R+G)} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{3R + 2G}{4(R+G)} \frac{\Delta R}{R}\right)$$

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R+G} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{3R + 2G}{4(R+G)} \frac{\Delta R}{R}\right)$$

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R+G} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - A \frac{\Delta R}{R}\right) \text{ avec } A = \frac{3R + 2G}{4(R+G)}$$

G est supérieure à 100 kΩ R = 300 Ω A ≈ 1/2

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R+G} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}\right)$$

Ce résultat montre que la tension (e) qui apparaît aux bornes de la diagonale de mesure du pont de Wheatstone est en première approximation proportionnelle à l'accroissement relatif de résistance $\frac{\Delta R}{R}$. Les variations relatives des résistances mesurées doivent être très faibles. Un tel montage n'est pas utilisable avec des jauges semiconductrices.

b) Toutes les jauges sont actives. Les quatre résistances $R_i = R$ varient de ΔR_i .

Le résultat précédent devient :

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R+G} \left[\frac{\Delta R_1}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R}\right) - \frac{\Delta R_2}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_2}{R}\right) + \frac{\Delta R_3}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_3}{R}\right) - \frac{\Delta R_4}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_4}{R}\right) \right]$$

soit avec les signes convenables (les mêmes pour deux branches opposées du pont) :

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R+G} \sum_{4 \text{ jauges}} \frac{\Delta R_i}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_i}{R}\right) \quad (1)$$

Exploitation de la valeur de e dans le cas d'un montage à quatre jauges :

Pour augmenter la valeur de e , deux jauges montées dans deux branches opposées doivent être sollicitées dans le même sens (traction ou compression).

Deux jauges montées dans deux branches voisines doivent être sollicitées en sens inverses.

Nous verrons (IVD3) que pour diminuer les dérives thermiques si

$$R_1 \text{ est soumise à la traction longitudinale } \frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

$$R_3 \text{ doit être soumise à la traction transversale } \frac{\Delta l_3}{l_3} = \nu \frac{\Delta l}{l}$$

$$R_2 \text{ doit être soumise à la compression longitudinale } \frac{\Delta l_2}{l_2} = - \frac{\Delta l}{l}$$

$$R_4 \text{ doit être soumise à la compression transversale } \frac{\Delta l_4}{l_4} = - \nu \frac{\Delta l}{l}$$

(ν représente la valeur du coefficient de Poisson du métal sur lequel sont collées les jauges).

La variation relative de résistance est liée à la variation relative de longueur de la grille de jauge par le facteur k de jauge donné par le constructeur.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l}$$

$$(1) \text{ devient alors } e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R + G} \sum_{\text{jauges}} k \frac{\Delta l_i}{l_i} \left(1 - \frac{1}{2} k \frac{\Delta l_i}{l_i} \right) \quad (3)$$

$$(2) \text{ et } (3) \rightarrow e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R + G} \left[k \frac{\Delta l}{l} \left(1 - \frac{1}{2} k \frac{\Delta l}{l} \right) + k \nu \frac{\Delta l}{l} \left(1 - \frac{1}{2} k \nu \frac{\Delta l}{l} \right) + \right. \\ \left. k \frac{\Delta l}{l} \left(1 + \frac{1}{2} k \frac{\Delta l}{l} \right) + k \nu \frac{\Delta l}{l} \left(1 + \frac{1}{2} k \nu \frac{\Delta l}{l} \right) \right]$$

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R + G} 2 k (1 + \nu) \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

Les termes du second ordre s'éliminent alors et un montage à quatre jauges peut être employé avec des valeurs de $\frac{\Delta R}{R}$ ou de $\frac{\Delta l}{l}$ élevées, sans introduire une erreur systématique.

Il sera en particulier utilisable avec des jauges semiconductrices. Pour la même raison le montage à 3 jauges actives par branche de pont de Wheatston montées en série ou en parallèle que nous utiliserons, n'introduit pas d'erreur systématique.

Nous pourrions alors appliquer le résultat suivant pour le cas d'un montage qui contient au moins une jauge active par branche du pont.

$$e_v = \frac{E_v}{4} \frac{G}{R + G} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5)$$

R_i représente la résistance de la branche i et ΔR_i la variation algébrique de R_i .

c) Variations capacitives

Si la tension d'alimentation du pont est alternative, les impédances des jauges pourront varier dans leur partie réactive.

Nous ne considérerons pas ces variations capacitives puisque le dispositif de détection synchrone (Fig.4A) lié au pont d'extensométrie ne restitue que le signal en phase ou en opposition de phase avec la tension d'alimentation.

2) Rappels du principe de fonctionnement d'une chaîne de mesure à fréquence porteuse. (Application au Pont Philips PR 9307)

a) Généralités

Les tensions à mesurer en extensométrie par jauges de déformations sont très faibles. En général, elles apparaissent dans la diagonale d'un pont de Wheatstone. Toutes les méthodes de mesures employées sont associées aux techniques de bas niveau et nécessitent une amplification.

b) Les ponts à courant porteur alternatif

Le schéma de principe de fonctionnement est représenté par la fig. 4A. Le pont de jauges est alimenté en courant alternatif, (sinusoïdal ou rectangulaire). On amplifie la tension de déséquilibre du pont. Cette tension amplifiée est démodulée en synchronisme de phase avec la porteuse pour donner le signe du signal de mesure. Le filtre passe-bas élimine la porteuse en restituant la composante moyenne du signal. A la sortie un enregistreur visualise la mesure.

c) Application au pont d'extensométrie Philips PR 9307 : Mode d'utilisation

Alimentation

L'alimentation du pont de jauges nécessite une tension constante, puisque la tension de déséquilibre est proportionnelle à la tension d'alimentation. Une variation de 1 % de la tension d'alimentation se traduit par une erreur relative de 1 % sur la valeur mesurée.

Le générateur doit être stabilisé en amplitude. La stabilisation en fréquence est moins importante.

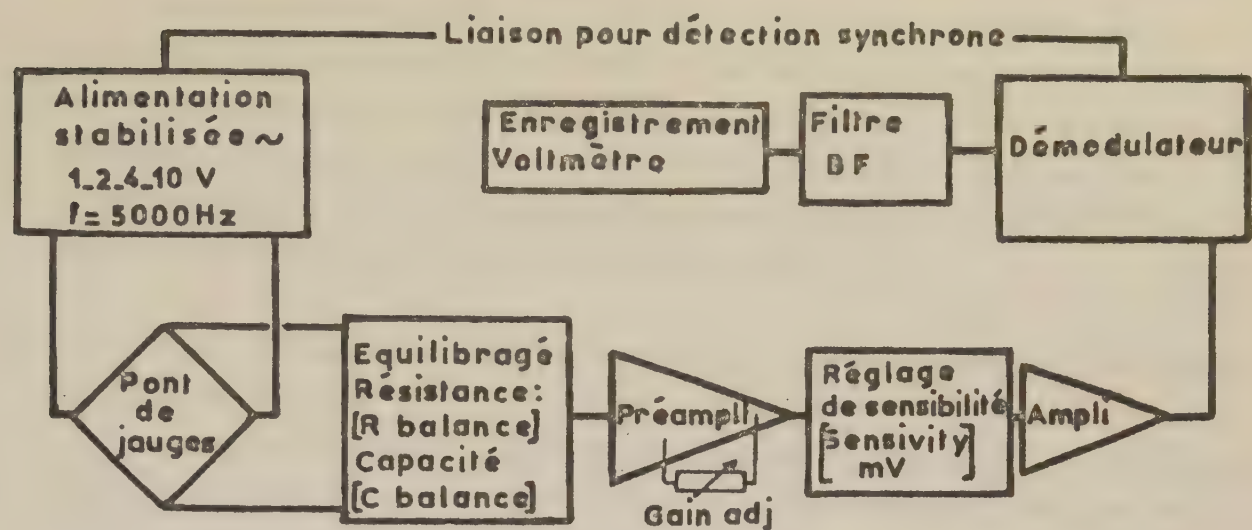
Dans les caractéristiques données par Philips pour le pont PR9307, on lit :

- dépendance du signal de sortie de la tension d'alimentation non mesurable à petite échelle pour des variations de tension admissibles du secteur (+ 10 %, -15 % de la valeur nominale) ou des piles (± 10 %).

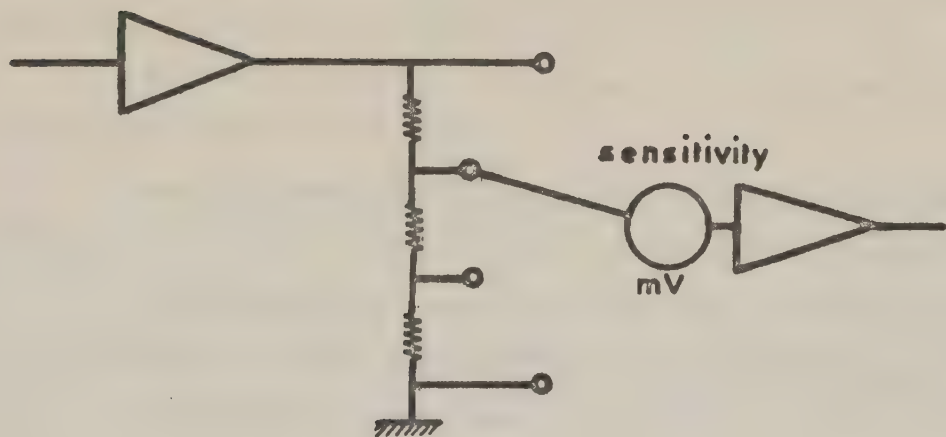
A - SCHEMA SYNOPTIQUE DE FONCTIONNEMENT ET D'UTILISATION

DU PONT -

FIG 4

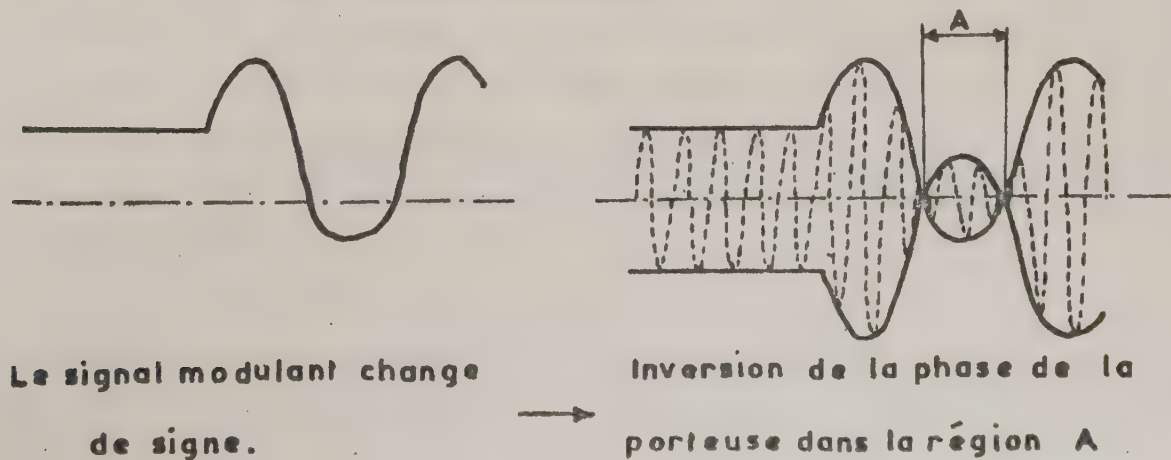


B - REGLAGE DE LA SENSIBILITE -



ROLE DE LA LIAISON POUR DETECTION SYNCHRONE: RESTITUTION DU SIGNE

DU SIGNAL MODULANT -



- Fréquence d'onde porteuse : 5 kHz ($\pm 1\%$). Il n'est pas nécessaire d'avoir une grande stabilité de la fréquence dans le temps, puisque cette dernière n'est que le support de l'information qui est éliminé en fin de chaîne par filtrage. Le choix de 5 kHz assure un bruit de fond minimum⁷, il permet d'autre part l'étude des vibrations mécaniques jusqu'à 1000 Hz, mais ceci nous intéresse moins pour notre travail.

La puissance de l'alimentation doit suffire à alimenter l'ensemble des ponts de jauges.

Le constructeur indique que la puissance prélevée sur l'alimentation ne doit pas dépasser 0,5 VA pour une tension d'alimentation comprise entre 4V et 10V.

La charge de sortie de tension d'alimentation peut varier entre 50 et 2000 Ω .

On ne peut choisir que les valeurs 1, 2, 4 ou 10 V sur le pont Philips.

La tension d'alimentation des trois ponts de Wheatstone montés en dérivation sur la figure (18C) doit être maximale.

Ces trois ponts ont une résistance de 300 Ω chacun (jauges de 300 Ω) soit une résistance équivalente de 100 Ω .

En choisissant une tension de 10 V, il faut une résistance équivalente de : $R = \frac{U^2}{P} = \frac{100}{0,5} = 200 \Omega$ pour prélever la totalité de la puissance.

La résistance à ajouter en série vaut donc 100 Ω ; c'est une résistance en constantan qui permet l'alimentation des trois capteurs en 5 V.

La charge de sortie vaut alors 200 Ω .

Equilibrage

Les impédances de chaque branche de pont diffèrent par suite des tolérances de fabrication des jauges ($\frac{\Delta R}{R} = 0,25\%$ pour les jauges à trame pelliculaire choisies) et des précontraintes de collage.

L'équilibrage permet de faire "le zéro" du pont de mesure, d'utiliser au mieux l'amplificateur, en faisant disparaître en l'absence de contraintes dues aux charges :

- la tension en phase ou en opposition de phase avec la tension d'alimentation du pont apparaissant dans la diagonale, qui est due aux différences de valeurs ohmiques initiales des jauges.

- la tension en quadrature avec celle d'alimentation du pont due aux différences de capacité entre chaque branche et aux capacités parasites.

Ces équilibrages sont constitués par une tourelle de résistances variables

(R Balance + Potentiomètre à 10 tours)

et par une tourelle de résistances variables et capacités

(C Balance + Potentiomètre à 5 tours)

montées en dérivation sur deux branches du pont.

Dans notre montage, avec une charge de 300 N (30 Kgf), l'utilisation du quart des valeurs de R (balance) et de C (balance) nous permet de refaire le zéro.

Amplification - Réglage de la sensibilité - étalonnage

Un préamplificateur et un amplificateur augmentent la puissance du signal de sortie.

Le réglage de la sensibilité (sensitivity mV) se fait entre les deux organes d'amplification (figure 4 B).

Pour que l'affichage de sensibilité soit correct (par exemple correspondance du signal à la valeur lue 0,2 mV en bout d'échelle), il faut étalonner en début de mesure le gain global des préamplificateurs et amplificateurs.

Cet étalonnage se réalise avec le potentiomètre Gain Adj. Après division, la tension d'alimentation est appliquée au préamplificateur.

La touche "CAL 0,8" indique le gain sur l'échelle bleue du galvanomètre, ou sur un multimètre branché sur le pont.

Pour une mesure exacte de la tension, l'aiguille doit se stabiliser sur le 2 de l'échelle bleue et rend possible un calibrage précis du gain. Au cours d'une manipulation, en enfonçant cette touche, on peut vérifier que la sensibilité est maintenue et pallier les effets des dérives dans le temps.

Cette mesure exacte de tension nécessaire en extensométrie où l'on calcule des contraintes est inutile dans le cas d'une pesée.

Cependant, le potentiomètre "Gain adj", qui commande le gain, nous permettra d'étalonner simplement l'instrument de mesure associé (Voltmètre digital) en unité de la grandeur physique. Par exemple : dans le montage à 3 ponts de Wheatstone montés en dérivation, sous une tension d'alimentation efficace de 4 à 5 V, avec la sensibilité correspondant à 0,2 mV, une variation de 1 digit du voltmètre est produite par une variation de charge de 10^{-4} N.

Pont de phase

La tension d'alimentation du pont est de la forme $E_v = E_{vo} \sin \omega t$. La tension aux bornes de la diagonale de mesure qui est proportionnelle à $E_v : e_v = E_{vo} \sin \omega t (A_1 + A_2 \sin 2 \pi Ft)$ est ensuite amplifiée : A_1 représente le signal dû à la contrainte statique et peut être négatif.

$A_2 \sin 2 \pi Ft$ est dû aux vibrations du système.

Il faut alors extraire la modulation due aux jauges, donc le signal proportionnel à $(A_1 + A_2 \sin 2 \pi Ft)$ tout en respectant le sens de A_1 . C'est le rôle du pont de phase qui agit en démodulateur ⁸.

A la sortie du pont de phase, un filtre passe-bas élimine le résidu de porteuse.

Influence des variations de température : données du constructeur

- stabilité du signal de sortie en fonction de la température meilleure que 0,05 % par degré.

Pour une variation admise de $\pm 5^\circ\text{C}$, la stabilité est meilleure que 0,5 %.

- temps de préchauffage : influence sur la mesure.

Après 30 mn, la valeur indiquée diffère au maximum de 0,2 % de la valeur réelle.

3) Autres solutions

On peut associer aux capteurs à jauges trois types de chaînes de mesures ^{9 10}.

- Les ponts à courant continu à large bande passante, à gain élevé, mais dont les dérives à long terme de l'amplificateur continu ne sont pas négligeables devant les faibles tensions à mesurer.

Ils sont tout à fait adaptés à des mesures de contraintes dynamiques (explosions, percussions) mais non à des mesures statiques de longue durée.

- Les ponts à courant porteur rectangulaire :

Ces appareils ne sont pas assez performants pour être utilisés en liaison avec les capteurs réalisés.

(ex : gain 2000 pour le conditionneur Jules Richard 52703)

Ils présentent l'avantage de ne pas nécessiter un équilibrage capacitif

- Les ponts à courant porteur sinusoïdal :

On pourra se reporter à ¹¹ pour la réalisation d'un tel appareil.

La stabilité du zéro et du gain élevé des amplificateurs alternatifs doit les faire préférer pour toute mesure précise, qui dure et qui ne nécessite pas une large bande passante.

Le pont d'extensométrie PR9307 appartient à ce troisième type. C'est un appareil de laboratoire, universel puisqu'on peut l'utiliser avec des capteurs ohmiques, inductifs, capacitifs.

Il comporte un galvanomètre à aiguille que nous n'utilisons pas puisque nous lui préférons un voltmètre numérique, quatre réglages possibles de la tension d'alimentation des jauges, une vaste gamme d'équilibrages résistif et capacitif.

Il existe maintenant des versions industrielles spécifiques des mesures par jauges, en modules miniaturisés (ex : 40 x 130 x 75 mm) pour lesquelles précision et stabilité ont été maintenues. Mais les variations de gain, la bande passante, les possibilités d'équilibrage ont été limitées. Il n'y a plus de galvanomètre associé.

Citons par exemple l'unité PR9872/00 de chez Philips, mise en vente en mai 1972.

ou les systèmes modulaires M I G de chez H.B.M.

B - Choix de l'élément sensible primaire du capteur : le corps d'épreuve

1) Définitions préliminaires

Corps d'épreuve : ce dispositif mécanique est une pièce métallique qui se déforme

sous l'influence des variations des forces à mesurer.

Fatigue ou endommagement par fatigue : C'est la modification des propriétés mécaniques des matériaux consécutives à l'application d'efforts.

Endurance : C'est la capacité de résistance à la fatigue.

Fluage : Le fluage est la variation en fonction du temps des déformations du matériau soumis à une contrainte constante.

2) Caractéristiques mécaniques du corps d'épreuve

Il faut rechercher un élément "traducteur" qui, avec la chaîne d'amplification associée :

- délivre une information proportionnelle à la force qui lui est appliquée dans le domaine d'intensité des forces où on l'utilise.
- soit constitué par un alliage parfaitement élastique, présentant peu ou pas d'hystérésis (résidu de déformation quand on relâche la contrainte) pour que les mesures puissent être faites rapidement et peu ou pas de fluage car l'utilisation de l'appareil pourra durer quatre heures sans interruption.
- ait une limite élastique élevée, pour obtenir un taux de travail faible, une grande sécurité en cas de surcharge accidentelle et une endurance pratiquement illimitée.

Il est souhaitable d'utiliser un corps d'épreuve dont la résistance est répartie identiquement en chaque point, c'est-à-dire, un élément pour lequel les contraintes normales maximales sont les mêmes dans chaque section.

Le taux de travail du métal défini comme le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte à la limite élastique, est alors le même sur toute la surface de la pièce. Toutes les zones sont également endurantes.

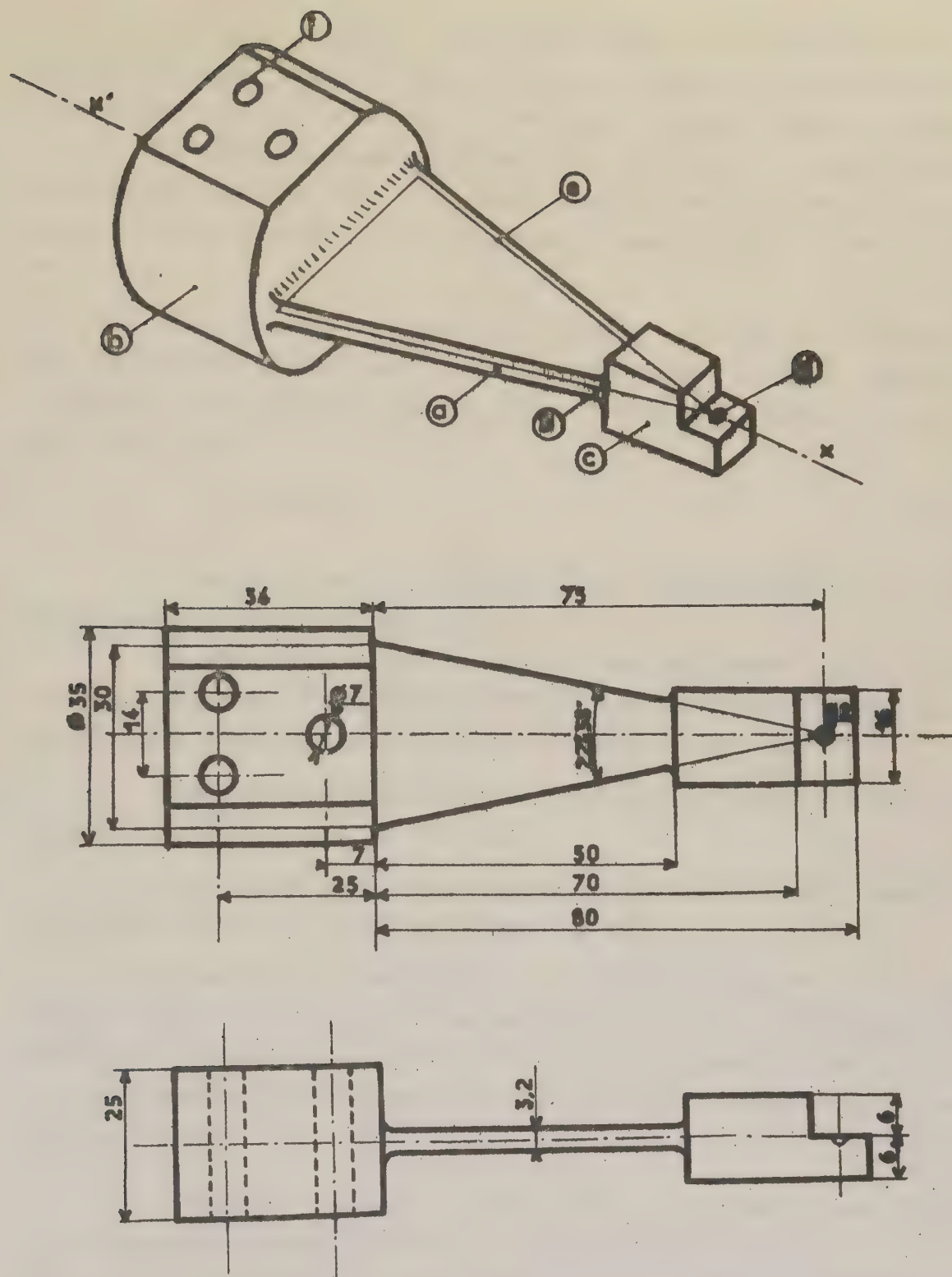
La variation de résistance des jauges collées dans une direction donnée proportionnelle aux contraintes égales dans cette même direction, est indépendante de la position des jauges.

Ce choix facilite l'opération de collage.

3) Choix du corps d'épreuve

a) *forme*

Les impératifs précédents ont fait choisir pour la partie active



CORPS D'EPREUVE

matière: U-Be2

traitements thermiques: Trempe 780°C à l'eau
Revenu 2h à 320°C

du corps d'épreuve une poutre cantilever utilisée en isoflexion. Cette poutre d'égale résistance travaille donc en flexion, et dans ce cas le module de section doit varier en fonction de l'abscisse x comme le moment fléchissant.

Le corps d'épreuve que nous avons usiné, est une lame d'épaisseur uniforme (a) ayant la forme d'un trapèze isocèle dont la grande base est encastrée dans une partie massive (b) (encastrement par taille dans la masse) (fig. 5).

La petite base est encastrée dans une partie assez résistante (c) pour supporter les contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant et porte le point d'application (d) situé au sommet du triangle isocèle (e) de la force (F).

b) Dimensions :

La table supportant l'élément à peser (oxygénateur) reposera par trois points (d) sur trois des capteurs.

Le choix de trois points d'appui donne un système isostatique pour lequel les réactions uniformément réparties sont facilement calculables, et les frottements aux points de contact [(d), table] sont diminués.

Chaque force (F) appliquée au sommet de la lame en isoflexion est en moyenne $\frac{300 \text{ N}}{3} = 100 \text{ N}$ (10 kgf)

La variation minimale à détecter que nous nous sommes imposée initialement est de 4.10^{-2} N par élément. (4 gf)

Il faut qu'avec cette force de 4.10^{-2} N l'instrumentation associée (jauges + pont d'extensométrie + voltmètre digital A 1613) fournisse un signal détectable. La sensibilité maximale du pont dans la gamme 0,1 mV, en bout d'échelle du galvanomètre utilisé avec ce pont à courant porteur sinusoïdal, est de $2 \mu\text{V}$ par division.

Supposons que la variation de 4.10^{-2} N crée un déplacement de l'aiguille du galvanomètre de une division, soit une tension $e_v = 2 \mu\text{V}$.

Ce signal amplifié avec un gain de 10 000 vaut alors 20 mV en sortie "tension" du pont. En branchant sur cette sortie un voltmètre numérique Rochar A 1613, c'est une indication de 20 digits que nous obtenons, sur la sensibilité 2 V pour 2000 digits, avec une bonne stabilité.

En remplaçant cette valeur de 2 μ V dans (1), avec un montage à quatre jauges actives et une tension d'alimentation alternative de $E_v = 4$ V, nous obtenons :

$$\Sigma \frac{\Delta l}{l} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot \frac{4}{2} = 10^{-6} \quad \text{pour un facteur } k \text{ de jauge égal à } 2.$$

Si le montage à quatre jauges comporte deux jauges longitudinales et deux jauges transversales, avec un coefficient de Poisson moyen de 0,3, la somme des déformations relatives pour les quatre jauges est de 10^{-6} . Au niveau d'une jauge longitudinale, cette déformation est donc de :

$$\frac{10^{-6}}{2,6} \approx 4 \cdot 10^{-7}$$

A la surface de la lame et dans la direction $x'x$ apparaît donc pour une variation de F égale à $\Delta F = 4 \cdot 10^{-2}$ N une variation relative de longueur de $4 \cdot 10^{-7}$.

Pour le calcul des dimensions des corps d'épreuve, les hypothèses suivantes ont donc été adoptées :

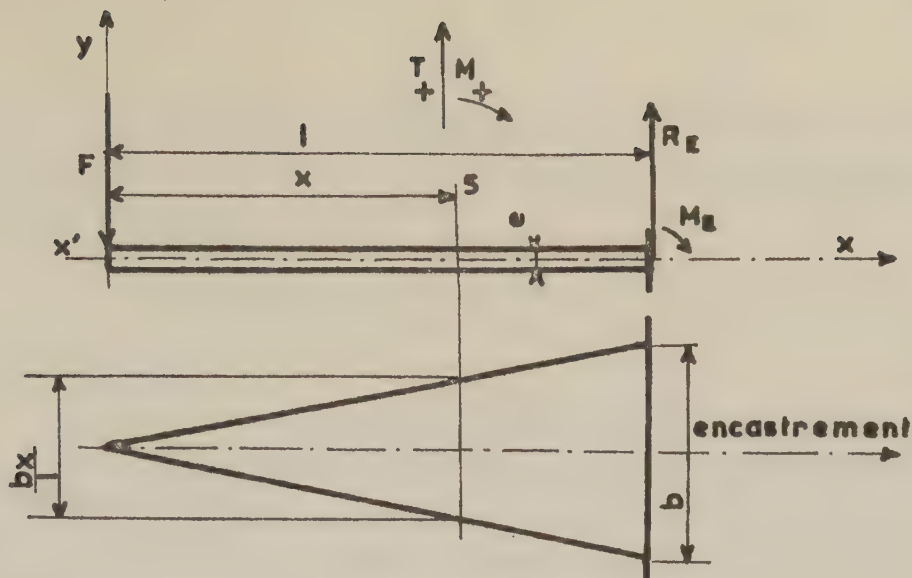
avec $\Delta F = 4 \cdot 10^{-2}$ N, $\frac{\Delta l}{l} = 4 \cdot 10^{-7}$ pour une jauge collée dans la direction $x'x$ $F_{\text{maxi}} \approx 100$ N (6)

- Recherche des grandeurs : e, b, l Fig. 6

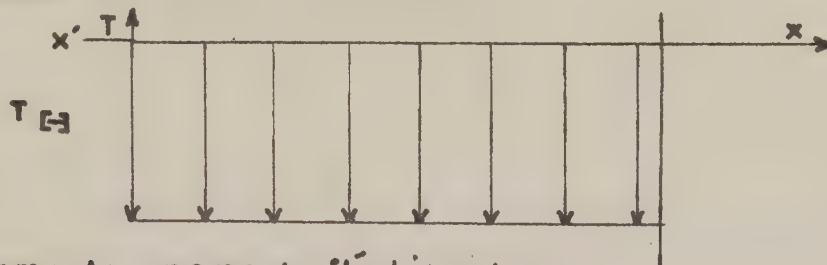
Les conventions choisies pour les valeurs positives du moment fléchissant et de l'effort tranchant sont indiquées sur la fig. 6.

Dans la section S d'abscisse x, les forces de gauche sont équivalentes à un effort tranchant : $\vec{T} = \vec{F}$ et à un moment fléchissant $M = F \cdot x$ (F et M sont négatifs et ceci respecte bien les conventions).

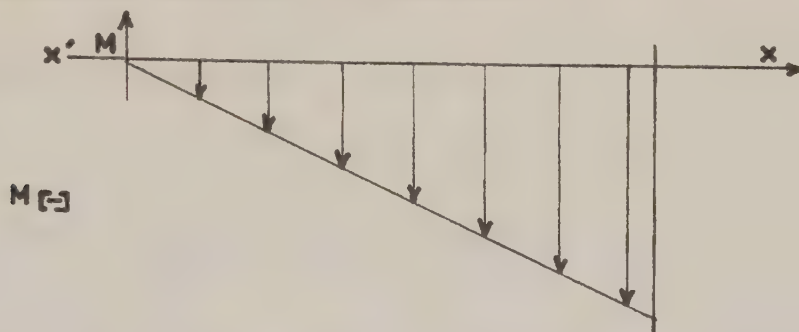
La section S pour laquelle les forces de gauche se réduisent à un effort tranchant, et à un moment fléchissant est donc soumise à la flexion simple.



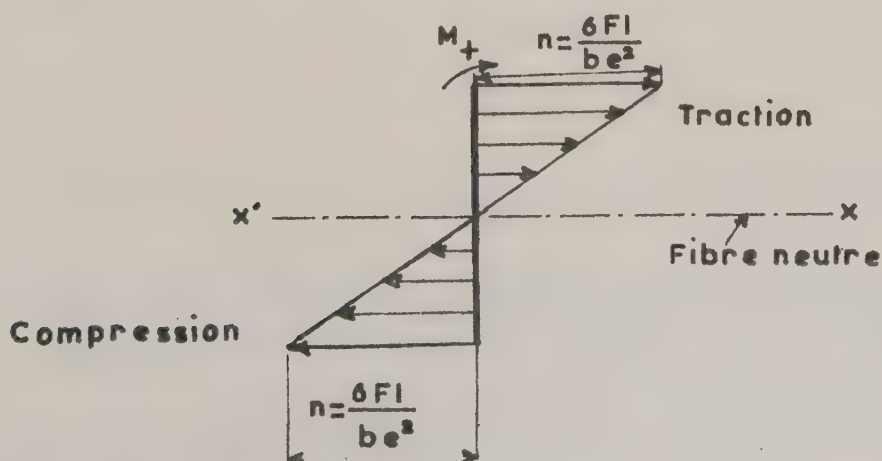
- Diagramme des efforts tranchants.



- Diagramme des moments fléchissants.



- Distribution des contraintes normales quelle que soit l'abscisse considérée



LAME TRIANGULAIRE EN ISOFLEXION

En utilisant des résultats de résistance des matériaux relatifs à la flexion simple $\sigma_{x \max.}^{12}$: (contrainte normale maximale dans la section S, d'abscisse x) est égale à : $\frac{M}{\frac{I}{v}}$

$$y'' = \frac{M}{EI} \quad \text{où :}$$

M représente le moment fléchissant dans la section S d'abscisse x

I représente le moment d'inertie de cette section par rapport à un axe horizontal passant par le centre de gravité

E représente le Module d'Young du métal constituant la lame

y est l'ordonnée de la déformée

y'' est la dérivée seconde de y par rapport à x.

$\frac{I}{v}$ est le module d'inertie de la section S

$$\text{nous avons } I = b \frac{x}{1} \frac{e^3}{12} \quad M = F x$$

$$y'' = \frac{12 Fl}{E b e^3} \quad \text{On remarque que } y'' \text{ est indépendante de } x. \text{ La}$$

courbure de la déformée a une valeur constante. La flexion est circulaire.

$$y' = \frac{12 Fl}{E b e^3} x + C_1 \quad \text{avec } y' = 0 \text{ pour } x = 1 \text{ (encastrement parfait).}$$

$$\text{Soit } C_1 = - \frac{12 Fl^2}{E b e^3} \quad \text{et } y' = \frac{12 Fl}{E b e^3} (x - 1)$$

$$y = \frac{12 Fl}{E b e^3} \frac{(x - 1)^2}{2} + C_2 \quad \text{avec } y = 0 \text{ pour } x = 1 \quad \text{soit } C_2 = 0$$

$$y = \frac{6 Fl}{E b e^3} (x - 1)^2 \quad (7)$$

Avec les conventions de la fig. 6, y et F sont négatifs.

En un point d'abscisse x, la flèche est donc proportionnelle à la force appliquée. Elle est maximale au point x = 0 soit en (d) et vaut :

$$f_d = \frac{6 Fl^3}{E b e^3}$$

On peut donc associer à un tel corps d'épreuve un capteur de déplacement qui mesurerait en un point donné la flèche "y" et donnerait d'après (7) une information proportionnelle à F.

- distribution des contraintes normales dans une section S
d'abscisse x : (fig. 6)

La pièce étant soumise à la flexion simple, les contraintes normales en un point de (S) d'ordonnée y, s'expriment par $n_x = \frac{M}{I} y$.

Au point $y = \pm \frac{e}{2}$ elles sont maximales et valent :

$$n_x \text{ maxi} = \pm \frac{F x}{\frac{be^3}{12} \frac{x}{1}} \frac{e}{2} = \pm \frac{6 F l}{b e^2}$$

Notons que les contraintes maximales de traction et de compression sont égales.

Elles contribuent seules à la déformation des fibres extrêmes.

- distribution des contraintes de cisaillement :

La pièce étant soumise à la flexion simple, la distribution des contraintes de cisaillement est parabolique dans une section droite ¹².

La tension ou le retrait provoqués par le moment fléchissant dans les fibres longitudinales extrêmes, ne sont donc pas affectés par le cisaillement.

La valeur maximale des contraintes de cisaillement est atteinte sur la surface neutre au point correspondant à la section minimale (g) sur la fig. 5.

$$t \text{ max est alors égal à } \frac{3}{2} \frac{T}{e b_m}$$

où b_m est la largeur de la section (g)

- Allongement relatif :

Comme nous l'avons montré, la surface du corps d'épreuve n'est soumise qu'à des contraintes normales de direction Ox.

L'allongement résultant obtenu à partir de la loi de Hooke est :

$$\epsilon_x = \frac{n_x}{E} = \frac{6 Fl}{E be^2} ; \text{ il est indépendant de } x \text{ et proportionnel à la}$$

force F appliquée. La flèche y au point d'application de F était proportionnelle à F mais elle dépendait de x

Conclusions :

$$\epsilon_x = \frac{6 Fl}{Ebe^2} \quad (8)$$

$$n_x = \frac{6 Fl}{be^2} \quad (9)$$

$$f_d = \frac{6 Fl^3}{Ebe^3} \quad (10)$$

$$t_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F}{eb_m} \quad (11)$$

avec $F = 4.10^{-2} \text{ N}$ $\epsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = 4.10^{-7}$ donc

$$\frac{1}{E be^2} = \frac{10^{-5}}{6} \quad (12)$$

l,b,E sont exprimées en unités

où E est une donnée pour le métal utilisé ; l, b, e sont choisies arbitrairement pour satisfaire la relation de dépendance.

$$\epsilon_x = \frac{6 mg l}{E b e^2} = \frac{6.10^{-5}}{6} x 9,81 \approx 10^{-4} \text{ m.}$$

m représente la masse appliquée en (d) exprimée en kg, ϵ_x représente un allongement relatif sans dimensions.

$$\epsilon_x = 10^{-4} \text{ m} \quad (13)$$

Si on exprime ϵ_x en microdéformations (symbole μD), pour une microdéformation correspond un $\frac{\Delta l}{l}$ de 10^{-6} $\epsilon_x (\mu D) = \epsilon_x 10^6$ (14)

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET MECANQUES DES CORPS D'EPREUVE
QUI PEUVENT ETRE REALISES AVEC TROIS ALLIAGES DIFFERENTS _FIG 7

Désignation des alliages .	AZ 8 GU	U Be 2	45 SCD 6
$E [N m^2]$	7.10^{10}	13.10^{10}	20.10^{10}
$\frac{1}{E b a^2} [N^{-1}]$	$\frac{10^{-6}}{6}$	$\frac{10^{-5}}{6}$	$\frac{10^{-6}}{6}$
$\frac{1}{b e^2} [m^{-2}]$	$\frac{7.10^5}{6}$	$\frac{13.10^5}{6}$	$\frac{20.10^5}{6}$
$b [m]$	30.10^{-3}	30.10^{-3}	30.10^{-3}
$l [m]$	60.10^{-3}	75.10^{-3}	100.10^{-3}
$e [m]$	$4,1.10^{-3}$	$3,2.10^{-3}$	3.10^{-3}
Contrainte à la limite élastique $[N m^{-2}]$	45.10^7	90.10^7	140.10^7
Contrainte maximale sous charge $[N m^2]$	7.10^7	13.10^7	20.10^7
Contrainte limite de fatigue $[N m^{-2}]$		18.10^7	
Taux de travail	1/6,4	1/7	1/7
Contrainte à la rupture $[N m^{-2}]$		130.10^7	
ϵ à la limite élastique	$6,4.10^{-3}$	7.10^{-3}	7.10^{-3}
ϵ à la limite élastique en $[\mu D]$	$6,4.10^3$	7.10^3	7.10^3
ϵ maximum sous charge $[\mu D]$	10^3	10^3	10^3
ϵ minimum mesuré $[\mu D]$	0,1	0,1	0,1
Flèche maximale $[m]$	$0,9.10^{-3}$	$1,6.10^{-3}$	$3,3.10^{-3}$

(13) et (14) entraînent :

$$\epsilon_x (\mu D) = 100 m (kg) \quad (15)$$

Nous pouvons ainsi connaître simultanément :

- l'allongement relatif du métal constituant le corps d'épreuve en un point de sa surface et dans la direction Ox (8)
- l'allongement relatif du fil de jauge collé sur ce métal, dans la même direction, en fonction de la charge appliquée en (d). (8).

Les résultats précédents (8 à 15) permettent après calcul d'établir le tableau récapitulatif de la fig. 7 pour trois alliages caractérisés par leur excellente élasticité.

Nous pouvons constater qu'on obtient sensiblement le même allongement relatif de 7.10^{-3} à la limite élastique conventionnelle définie à 0,2 %, pour les trois alliages, également utilisables de ce point de vue.

Pour une utilisation importante, le choix se ferait en fonction du prix, car ces alliages ont des densités différentes et sont vendus au kilogramme.

En ce qui nous concerne, nous avons utilisé le cuivre au béryllium parce que c'est le seul alliage que nous avons pu obtenir dans un délai raisonnable, par petite quantité, à l'état trempé.

Les contraintes maximales de cisaillement dans la section g valent :

$$t_{\max} = \frac{3}{2} \frac{100}{3,2} \frac{10^3}{10} \frac{10^3}{10} \approx 0,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

Les contraintes normales maximales ($13 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$) sont inférieures ou égales au septième de la contrainte de limite élastique à 0,2 %, ceci assure une excellente linéarité, une hystérésis faible, une endurance illimitée, un coefficient de sécurité élevé en cas de surcharge : ce coefficient de sécurité est de 7 sans dépassement de la limite élastique et de 10 avant rupture.

c) Métal du corps d'épreuve

L'alliage que nous utilisons est un cupro-béryllium contenant 97,5 % de cuivre, 2% de béryllium. Les autres éléments d'addition sont le nickel et le cobalt. Le symbole A.F.N.O.R. de cet alliage est U-Be 2.

- Etat trempé demi-dur : le diagramme d'équilibre cuivre-béryllium montre que le béryllium peut se dissoudre en phase α (cubique à faces centrées) dans le cuivre. En trempant l'alliage, en le portant à la température de 800°C et en le refroidissant suffisamment vite, on peut maintenir le béryllium dans le cuivre, à l'état α , à température ambiante.

L'écrouissage avant "revenu" améliore les caractéristiques mécaniques après "revenu" : accroissement de la dureté, de la charge à la rupture, de la résistance à la fatigue.

Cependant, les nuances les plus écrouies sont sensibles aux défauts de la surface et aux tensions internes, ce qui est gênant pour l'utilisation des jauges.

Nous avons choisi un état intermédiaire : Trempé demi-dur.

	lim. élastique à 0,2 % (N / m ²)	Contrainte de rupture minimale (N / m ²)	Dureté Vickers
Trempé $\frac{1}{2}$ dur	40 10 ⁷	60 10 ⁷	190
Après revenu 2h à 320°C	90 10 ⁷	128 10 ⁷	375

- Difficultés d'usinage :

Après revenu, la dureté du métal est doublée.

L'usinage doit s'effectuer avant revenu avec des outils au carbure. Les passes doivent être profondes pour pénétrer sous la couche écrouie qui est durcie par la passe précédente, ceci est difficilement compatible avec une excellente précision sur la cote d'épaisseur de la partie active des corps d'épreuve (a).

Il faut arroser abondamment pour que la température du métal ne dépasse pas 320°C.

- Revenu :

Ce nouveau traitement s'effectue dans un four à revenu chauffé sur sa périphérie par des résistances, pendant deux heures, à 320°C température inférieure à la température de transformation eutectoïde.

Le revenu a pour but de réordonner les atomes de béryllium qui se rassemblent dans les plans (1,0,0), en augmentant les propriétés mécaniques, comme le montre le tableau précédent.

Nous avons effectué un premier traitement sur un corps d'épreuve d'essais.

Après refroidissement, pendant douze heures dans le four jusqu'à la température ambiante, aucune déformation macroscopique des pièces traitées n'a été observée.

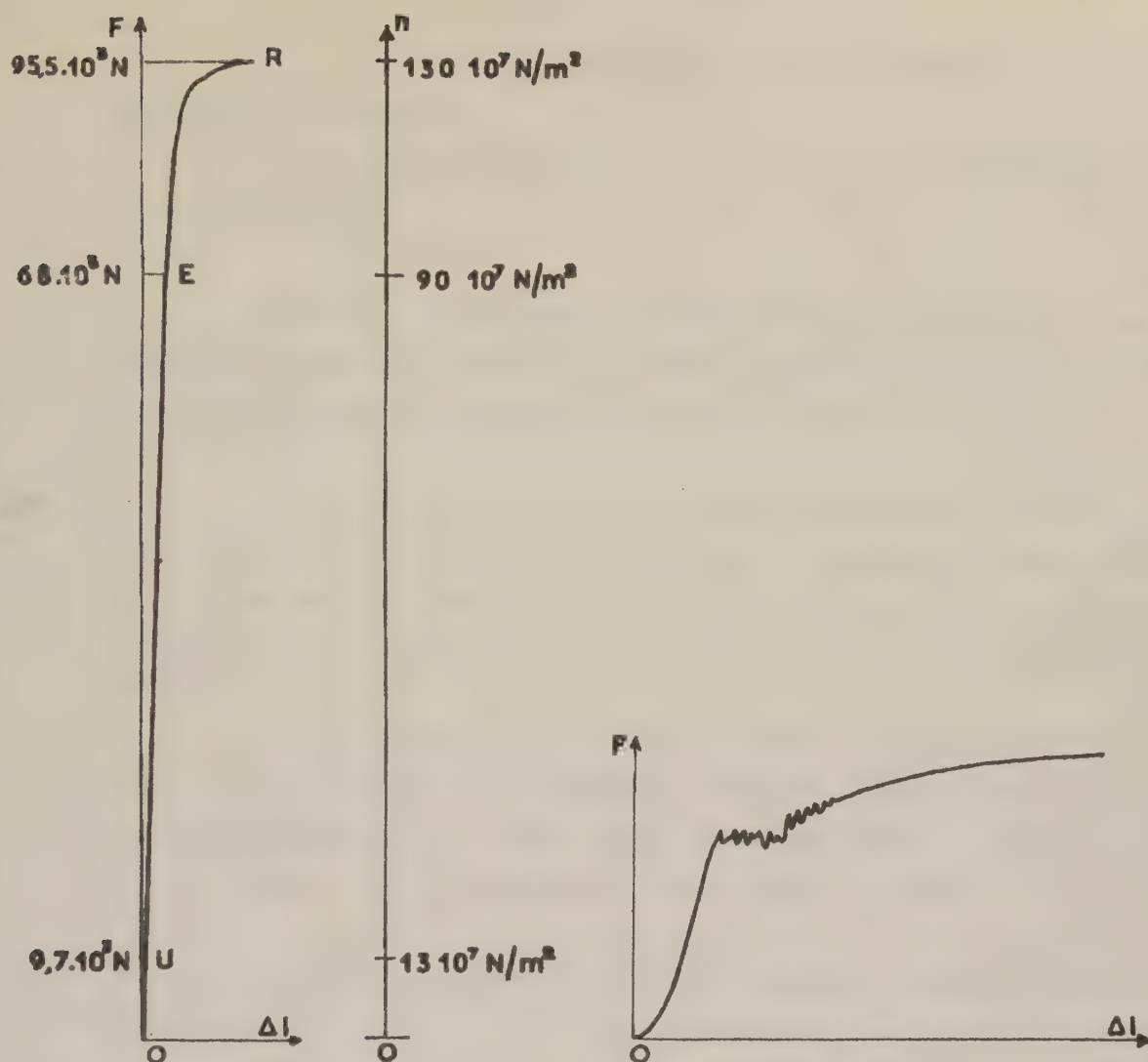
L'oxydation superficielle du métal résultant de l'atmosphère non neutre utilisée est aisément supprimée au "papier de verre".

Nous avons effectué un deuxième traitement dans des conditions identiques sur cinq corps d'épreuve et sur l'éprouvette d'essais de traction. Toutes ces pièces étaient placées à égale distance des résistances chauffantes.

- Comparaison des résultats de nos mesures aux données du fabricant :

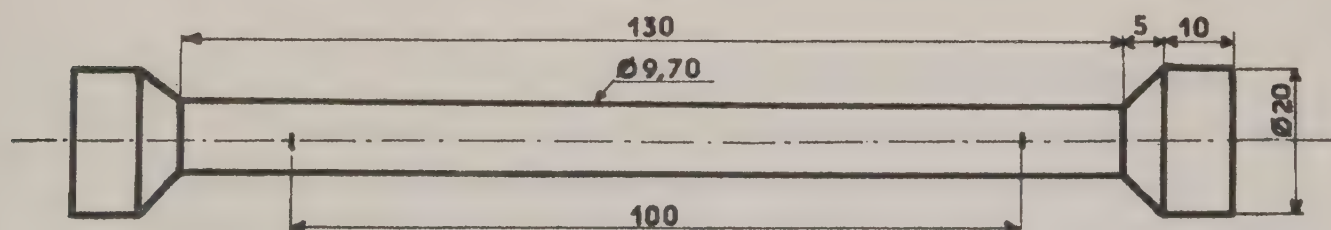
Les deux essais de traction et de dureté suivants permettent de déterminer si les propriétés obtenues sur un échantillon ayant subi les mêmes traitements thermiques que les corps d'épreuve sont conformes aux données du fabricant.

COURBES CHARGE-ALLONGEMENT à la même échelle



EPROUVETTE en U-Be2
Trempe 780°C à l'eau
Revenu 2h à 320°C.

EPROUVETTE en Adx



ESSAIS DE TRACTION

α - Essai de traction d'une éprouvette en U-Be 2 après traitements thermiques

La machine "Testa U2-100" d'essais de traction a une capacité maximale de $2 \cdot 10^5$ N.

Les mors choisis pour la fixation de l'éprouvette montés sur coquilles sphériques permettent d'éviter toute flexion parasite au serrage, et tout glissement de la pièce au début de l'essai.

Le schéma (8) précise la forme de l'éprouvette utilisée. Son diamètre de 9,70 mm a été choisi pour utiliser toute l'échelle de mesure des forces de traction dans la gamme d'efforts de la machine (10^{-5} N). Le point R du graphe correspond à la rupture de l'éprouvette soumise à une charge de $9,55 \cdot 10^4$ N (9 550 kgf)

La contrainte normale conventionnelle de rupture par traction vaut donc : $129,5 \cdot 10^7$ N/m². La contrainte rationnelle qui est le rapport entre la charge appliquée et la section finale de l'éprouvette, supérieure puisqu'il y a eu striction de l'éprouvette, vaut : $132,5 \cdot 10^7$ N/m².

L'allongement mesuré par la variation de distance entre deux traits repérés sur l'éprouvette à la rupture, est de 2 %.

Le diagramme charges-allongements de la Fig. 8 met en évidence le point correspondant à la limite élastique à 0,2 % : E_1 ainsi que le point U pour lequel la contrainte normale moyenne dans l'éprouvette de traction est égale aux contraintes normales maximales obtenues à la surface de la partie active du corps d'épreuve sous une charge de 100 N. (10 kgf)

β - Essais de dureté après traitements thermiques

Des mesures de dureté ont été effectuées sur le diamètre 20 mm de l'éprouvette d'essais de traction et sur la lame triangulaire d'une pièce d'études préliminaires, à l'aide d'une machine Testwell, sous une charge de 1500 N (150 kgf), avec une pointe conique, compte-tenu de la dureté escomptée.

La valeur moyenne de la dureté, identique sur les deux pièces est de 39 HRC (Rockwell cône) ce qui correspond, d'après les abaques à une dureté Vickers de 380.

Les résultats de ces essais permettent de conclure que les pièces trempées, écrouies demi-dur, usinées et revenues sont conformes aux données du fabricant.

Tableau comparatif

	Valeurs indiquées par le fabricant (minimales)	Valeurs obtenues
contrainte de rupture	$128 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$	contrainte conventionnelle: $129,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ ----- contrainte rationnelle : $132,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
Allongement en %	1	2
Dureté Vickers	375	380

- Fatigue du métal constituant le corps d'épreuve

Les contraintes maximales s'exerçant à la surface de la partie active du corps d'épreuve sous charge n'atteignent que le septième de la limite élastique du métal, soit $13 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$.

Le fabricant indique une limite de fatigue en flexion alternée de $20 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ pour 10^8 cycles.

Les conditions de notre problème sont différentes puisqu'il superpose une sollicitation alternée de valeur faible à une contrainte statique.

Le diagramme de Smith ¹³ qui définit les valeurs des contraintes statiques et dynamiques qui peuvent exister séparément montre que le métal est utilisé dans une zone d'endurance illimitée.

c) Mesures de flèches d'un corps d'épreuve par un capteur de déplacement.

- Principe de fonctionnement du capteur de déplacement utilisé

Le capteur CIMATRON CADI 30 N° 168 256 utilise le principe du "transformateur différentiel".

Le primaire est alimenté par une tension alternative provenant d'un oscillateur incorporé dans le boîtier de l'appareil.

Comme le montre la figure (9), un noyau se déplace entre deux enroulements secondaires, entraînant ainsi une variation de leur couplage avec le primaire.

La tension alternative différentielle résultante est démodulée et le signal de sortie redressé est proportionnel au déplacement du noyau et son signe indique le sens du déplacement.

- sensibilité

Le constructeur indique une sensibilité de 38,3 mV/mm et par volt d'alimentation, sous une charge de 20 k Ω , avec une linéarité de $\pm 0,2\%$, pour une course de ± 3 mm.

Ces données ont été confirmées (fig. 9)

- Mesures des flèches du corps d'épreuve

Le capteur de déplacement est fixé rigidement au bâti comportant le corps d'épreuve.

Le noyau s'appuie sur la partie massive (c) du corps d'épreuve en un point distant de 15 mm du sommet de la lame triangulaire.

En ce point, la tension de sortie donc aussi la flèche, est une fonction linéaire de la charge appliquée.

La sensibilité obtenue est de 4,12 mV/N entre 0 et 100 N. pour une tension d'alimentation de 10 V, et une charge de 20 k Ω

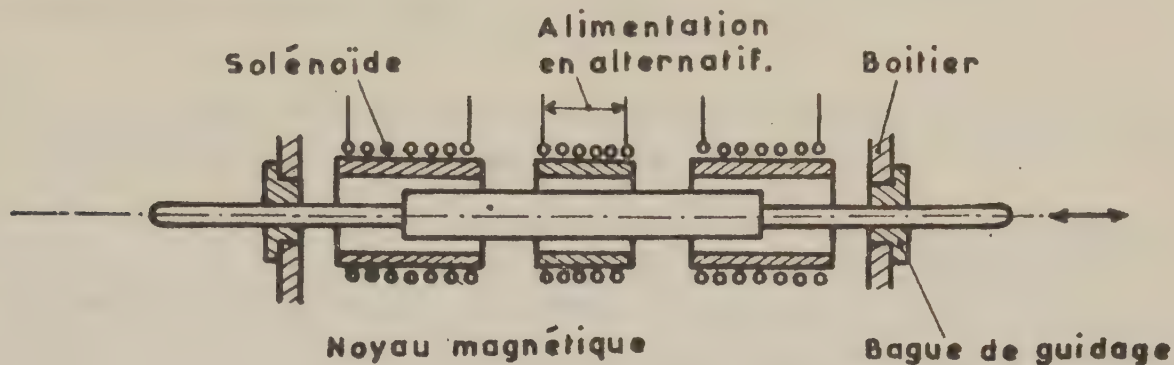
$$\text{La flèche correspondante } \frac{1 \times 4,12}{38,3} = 0,011 \text{ mm/N}$$

_ CAPTEUR DE DEPLACEMENT : SCHEMA DE PRINCIPE MONTAGE _

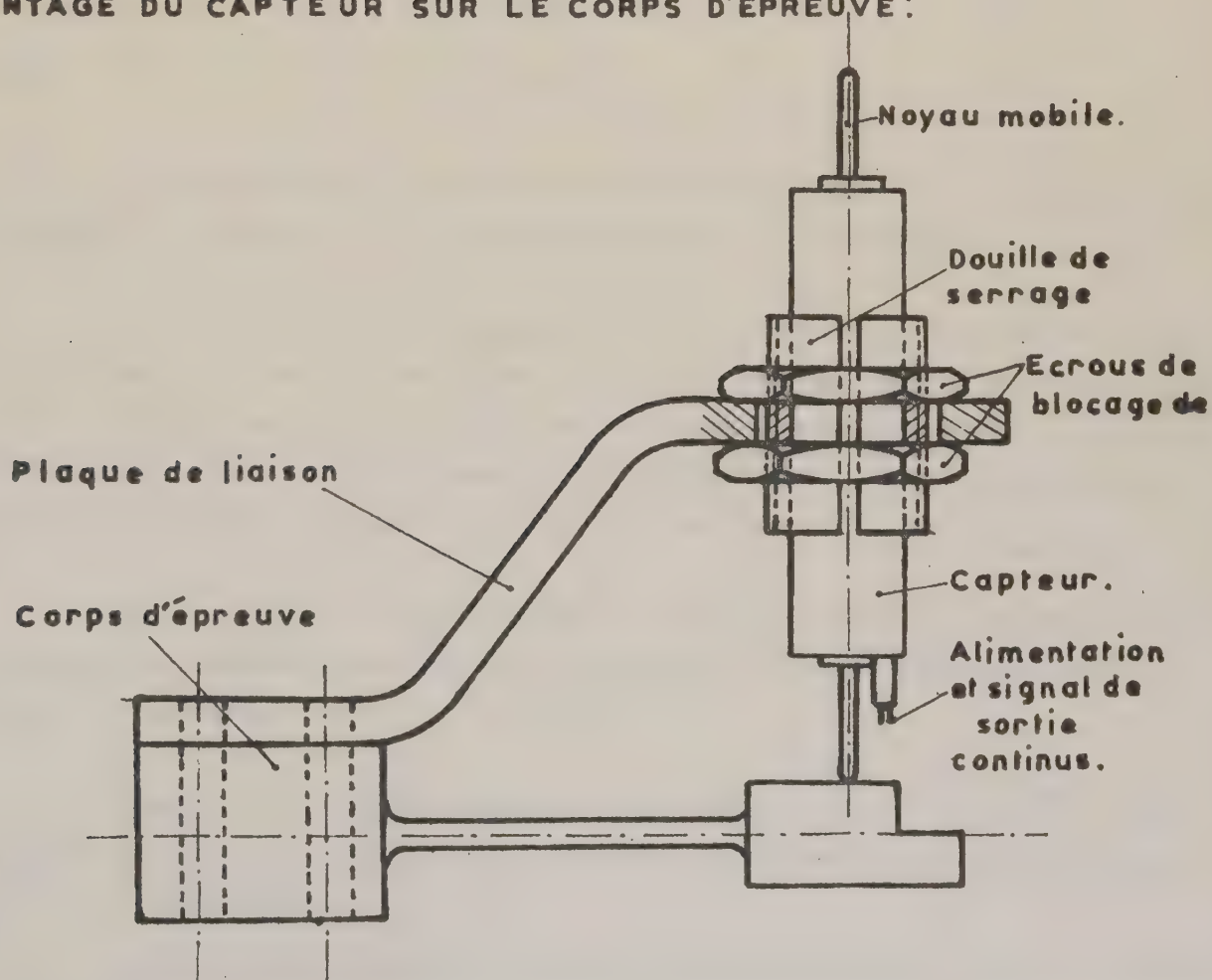
C.A.D.1:30.

FIG9

A) FONCTIONNEMENT EN TRANSFORMATEUR DIFFERENTIEL :



B) MONTAGE DU CAPTEUR SUR LE CORPS D'EPREUVE :



_ Mesures de flèches du corps d'épreuve _

Valeurs calculées des flèches en ce point :

Nous avons montré qu'en un point d'abscisse x , la pente de la tangente à la déformée était $y' = \frac{12 Fl}{Eb e^3} (x - 1)$

Cette pente peut être considérée comme constante entre $x = 0$ et $x = 25$ mm puisque (c) est une partie massive rigide.

L'équation de la déformée pour $0 < x < 25$ mm est donc $y = ax + b$.

Au point $x = 25 \cdot 10^{-3}$ m. $y' = a = \frac{12 Fl}{Eb e^3} (x - 1) = -31,25 \cdot 10^{-5} F$

$$y = \frac{6 Fl}{Eb e^3} (x - 1)^2 = 782 \cdot 10^{-8} F \text{ soit } b = 1563 \cdot 10^{-8} F$$

$$y = -31,25 \cdot 10^{-5} Fx + 1563 \cdot 10^{-8} F \quad (16)$$

Pour $x = 0$ $y = 1,563 \cdot 10^{-5} F$

En considérant la flexion circulaire même entre $x = 0$ et $x = 25 \cdot 10^{-3}$ m. on obtient $y = 1,756 \cdot 10^{-5} F$ (soit une flèche 15 % supérieure).

Les calculs ci-dessus montrent que si on relie un capteur de déplacement à l'une des lames triangulaires, il faudrait réduire la longueur de la partie rigide (c), tout en maintenant à la section minimale une résistance compatible avec les contraintes de cisaillement, afin d'obtenir une flèche plus importante pour un même taux de travail du métal à la flexion.

On peut encore remarquer que $y = 0$ pour $x = 50 \cdot 10^{-3}$ m quelle que soit F . Toutes les tangentes aux déformées du point $x = 25 \cdot 10^{-3}$ m passent par le point $x = 50 \cdot 10^{-3}$ m

Pour $x = 15 \cdot 10^{-3}$ m, l'équation (16) montre que $y = 1,1 \cdot 10^{-5} F$. Soit encore 0,011 mm/N : valeur identique à la valeur expérimentale obtenue avec le capteur de déplacement.

On peut donc conclure que la liaison d'un des corps d'épreuve que nous avons réalisé avec un capteur de déplacement, pour obtenir un signal électrique proportionnel à la force appliquée au sommet de la lame, est tout à fait possible.

Avec trois lames, il faut utiliser trois capteurs de déplacements et le montage devient encombrant par rapport à un système à jauges entièrement dissimulé.

4) Fréquences de vibrations des lames - Filtrage

a) *Vibrations d'une lame triangulaire disposée horizontalement suivant un axe vertical sous son propre poids.*

L'étude d'une lame triangulaire disposée verticalement et vibrant suivant un axe horizontal est faite par H. BOUASSE¹⁴. Notre problème se traite de façon analogue.

$$\begin{aligned} &\text{L'équation de départ } T - (T + \frac{T}{x} dx) = \rho \frac{bx}{l} e. dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ &\text{conduit à } \frac{E}{\rho} \frac{e^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (x \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) = x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \end{aligned}$$

résolue en posant $y(xt) = u(xt) \sin 2\pi ft$, en cherchant deux solutions particulières sous forme de séries, et en considérant qu'à l'encastrement : $u = 0$; $\frac{du}{dy} = 0$

La valeur de f vaut alors :

$$f_r = 1,139 \frac{e}{2} \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Application à la lame en U.Be2

$$e = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad l = 75 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \rho = 8250 \text{ kg/m}^3 \quad E = 13 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

On tire :

$$f_r = 740 \text{ Hz}$$

La fréquence propre de la lame triangulaire seule, vibrant selon une direction verticale est de 740 Hz.

b) Vibrations d'une lame triangulaire en fonction des masses appliquées à son sommet.

- Rappels de résultats applicables aux ressorts :

Considérons un ressort s'allongeant d'une valeur f_{st} (flèche statique) sous l'effet d'une masse m appliquée : si k_r représente la rigidité du ressort nous avons :

$$mg = k_r f_{st} \quad \text{ce qui donne} \quad \frac{k_r}{m} = \frac{g}{f_{st}}$$

L'équation fondamentale de la dynamique appliquée à un ressort vibrant :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - k_r (f_{st} + x) \text{ devient à l'aide de la relation précédente}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k_r}{m} x = 0 = \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x$$

$$\text{Soit } \omega^2 = \frac{k_r}{m} = \frac{g}{f_{st}}$$

Pour un ressort, une mesure de pulsation peut se faire à partir d'une mesure de flèche statique.

- Corps d'épreuve assimilé à un ressort

Un ressort est une structure pouvant emmagasiner et restituer de l'énergie.

D'après cette définition la lame qui emmagasine le travail de la force F , en se déformant, restitue cette énergie en revenant à sa position initiale quand F disparaît.

Elle peut donc être considérée comme un ressort.

La flèche statique d'un tel ressort a été calculée sous la charge F et à l'abscisse x .

$$\text{Elle vaut } y = \frac{6 Fl(x-1)^2}{Ebe^3}.$$

$$\text{Au point d'application de } F \quad y = f_{st} = \frac{6 Fl^3}{Ebe^3}$$

$$\omega^2 = \frac{k_r}{m} = \frac{g}{f_{st}} \quad \text{soit } k_r = \frac{Ebe^3}{6l^3}; \quad \omega^2 = \frac{Ebe^3}{6ml^3} \rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{Ebe^3}{6ml^3} \right)^{1/2}$$

Le coefficient de raideur et la fréquence de vibrations de la lame assimilée à un ressort viennent d'être calculés en fonction du métal constituant cette lame et de ses dimensions géométriques.

Application numérique :

$$k_r = 5.10^4 \text{ N/m}$$

$$f_r = 35,8 \text{ m}^{-1/2} (\text{Hz})$$

A titre de comparaison les ressorts (traducteurs T_1 du diagramme) avaient un coefficient de raideur de $3,3 \cdot 10^3 \text{ N/m}$

c) Vibrations propres de la lame triangulaire avec la partie rigide (c) placée à son sommet, sans autre masse appliquée.

Dans ce cas, les poids de la lame triangulaire et de la partie rigide sont voisins.

On ne peut plus négliger l'un par rapport à l'autre. Le principe du calcul est posé par H. Salles¹⁵ pour une poutre à inertie constante.

Appliquons-le à la lame triangulaire avec : $I(x)$. La déformée a été calculée avec une charge F .

$$\text{Elle vaut : } y = \frac{6 F l}{Ebe^3} (x - 1)^2$$

Nous étudions les vibrations autour de cette position d'équilibre.

Soit Y les déplacements à partir de cette position. La force F_1 créant ce déplacement est telle que :

$$Y = \frac{6 F_1 l^3}{Ebe^3} \quad \text{au point d'application de } F.$$

La déformée à partir de la position d'équilibre vaut :

$$y = \frac{6 F_1}{E b e^3} \frac{1(x-1)^2}{1^2} = Y \cdot \frac{(x-1)^2}{1^2}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dY}{dt} \frac{(x-1)^2}{1^2}$$

Valeur de l'énergie cinétique totale :

$$2 T = \int_0^1 \rho dV \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + m \left(\frac{dY}{dt} \right)^2$$

$$= \int_0^1 \rho \frac{b e}{1^5} \left(\frac{dY}{dt} \right)^2 x(x-1)^4 dx = \frac{M}{15} \left(\frac{dY}{dt} \right)^2$$

avec $M = \rho \frac{b l}{2}$ e (masse propre de la lame triangulaire)

m est la masse de la partie rigide (c)

$$2 T = (m + \frac{M}{15}) \left(\frac{dY}{dt} \right)^2$$

La masse à considérer n'est pas m , mais $m + \frac{M}{15}$

$$\text{avec } m = 18 \text{ g} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad f_r = \frac{35,8}{\sqrt{m + \frac{M}{15}}} = 254 \text{ Hz}$$

$$M = 30 \text{ g} \quad 30 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$f_r = 254 \text{ Hz}$$

La seule présence de la partie rigide divise la fréquence propre de la lame par 3 environ.

d) Valeurs expérimentales (fig. 10).

L'étude expérimentale des fréquences de vibrations des lames en fonction des masses appliquées est réalisée avec des jauges semiconductrices qui délivrent un signal de sortie plus important que les jauges métalliques pour une même déformation.

L'enregistrement se fait rapidement et il n'y a pas à craindre un phénomène de dérive.

L'enregistrement HBM à spot lumineux est du type AF4 UV. Sa base de temps est étalonnée à l'aide d'un chronomètre.

Exemple de détermination de la fréquence de vibrations correspondant à une masse appliquée de 8 kg + la masse de la nacelle 0,5 kg.

L'intervalle de temps séparant deux éclats lumineux est 0,182 s. Chaque éclair impressionne le papier sensible selon une ligne parallèle tracée sur la largeur du papier.

Compte-tenu de la vitesse de déroulement (20 mm/s), la distance séparant deux traits (mesurée sur 20 intervalles) est 3,65 mm.

Vingt périodes de vibrations enregistrées correspondent à une longueur déroulée de 36 mm.

On peut déduire la durée d'une période puis la fréquence de vibrations de la lame chargée avec 8,5 kg :

$$F_r = \frac{3,65 \cdot 20}{0,182 \cdot 36} = 11,6 \text{ Hz}$$

La valeur théorique conduisait à $F_r = 12 \text{ Hz}$.

Nous utilisons la même méthode pour mesurer la fréquence propre de vibrations de la lame.

La vitesse de déroulement plus grande est 93 mm pendant 0,182 s (500 mm/s).

Une période de vibration correspond à une longueur de 1,97 mm,

$$\text{Soit } F_r = \frac{93}{0,182 \cdot 1,97} = 260 \text{ Hz}$$

La valeur théorique conduisait à $F_r = 254 \text{ Hz}$.

FREQUENCES DE VIBRATIONS DES CORPS D'EPREUVE EN
FONCTION DES MASSES APPLIQUEES

FIG 10

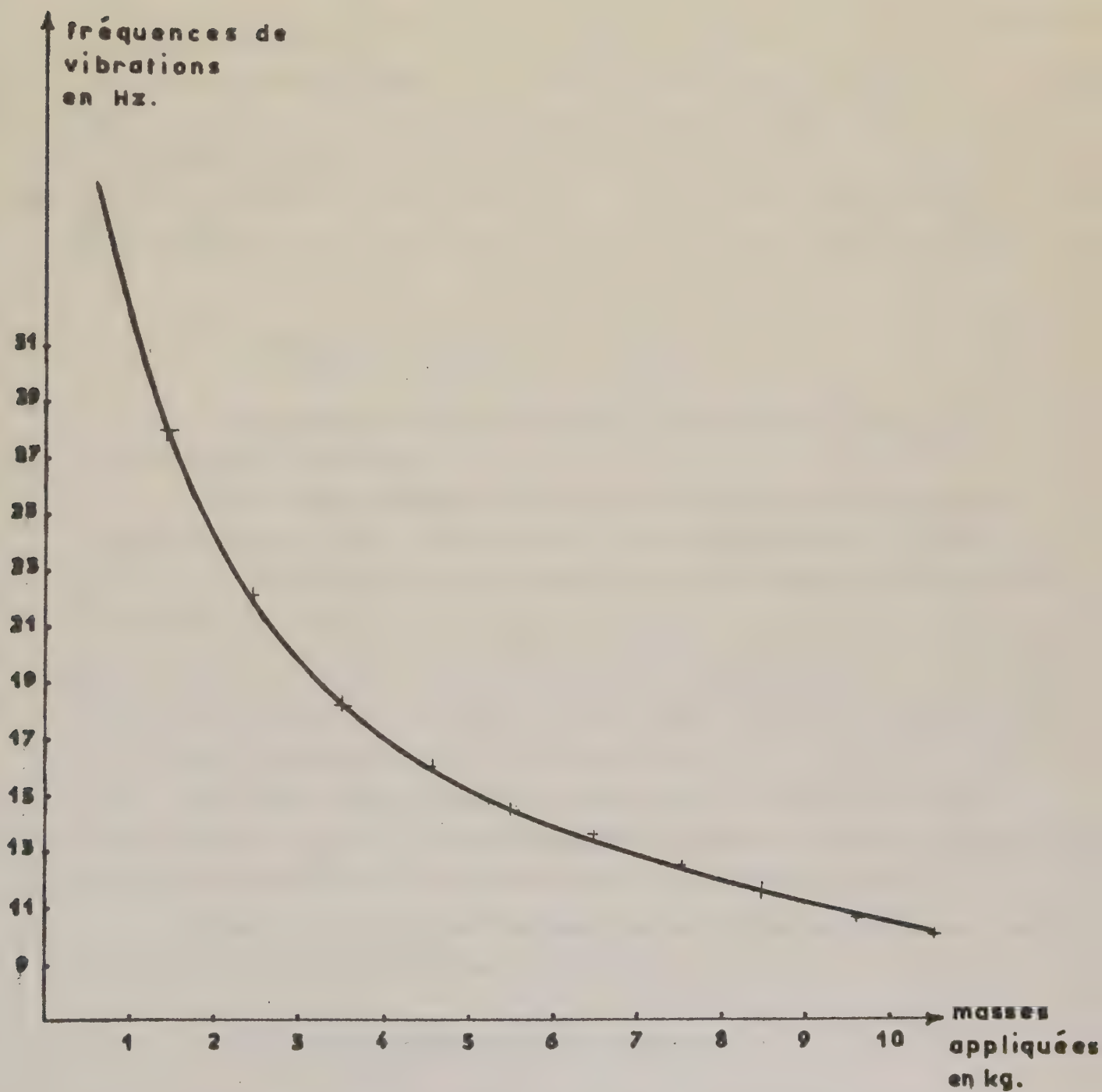


Tableau comparatif des fréquences de vibrations théoriques et expérimentales obtenues.

m(masse appliquée au sommet d'une lame en kg)	0	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
F _{rc} (fréquences de vibrations calculées en Hz)	254	18,7	16,5	14,9	13,8	12,7	12	11,3	10,8
F _{re} (fréquences obtenues par expérimentation) en Hz	260	18,1	16	14	13,5	12,5	11,6	10,8	10,2

e) Vibrations forcées.

L'oxygénéateur repose sur les trois capteurs par l'intermédiaire du plateau en acier inoxydable.

Pour l'expérimentation, on réalise un circuit fermé, qui comporte l'oxygénéateur et la pompe à galets qui fait circuler de l'eau. Les tuyaux sont fixés au plateau pour ne pas introduire par leur mouvement des variations d'accélération parasites.

Sur l'écran d'un oscilloscope branché à la sortie du pont d'extensométrie, on constate que la fréquence et l'amplitude des vibrations induites par le moteur d'entraînement des disques de l'oxygénéateur sont directement reliées à sa vitesse de rotation, pour $v = 120$ tours/minute.

Les vibrations produisent une déviation identique à celle d'une masse appliquée de $25 \cdot 10^{-3}$ kg. Les fréquences des vibrations induites (fondamentale 2 Hz) sont différentes de la fréquence propre de l'ensemble (10 Hz).

Bien qu'il n'y ait pas résonance, un tel système ne nous permet pas d'obtenir la précision désirée de $\pm 10 \cdot 10^{-3}$ kg.

f) Atténuation mécanique des vibrations.

Le moteur monté en porte-à-faux à une extrémité de l'oxygénéateur doit être considéré, du fait de son équilibrage imparfait, comme un balourd de masse m situé à une distance d de l'axe, tournant à la même vitesse que lui, et qui excite un oscillateur de masse M et de fréquence propre ω_0 .

Rappelons que dans ce cas ¹⁶ l'amplitude transmise, proportionnelle au carré de la vitesse de rotation vaut :

$$X = \frac{md}{M} \frac{r^2}{1 - r^2} \quad \text{avec } r = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \omega \ll \omega_0$$

La vitesse usuelle de rotation des disques pendant une opération est de 100 tours/mm. Pour atténuer X, il faut éliminer toute cause de balourd. Nous avons monté pour cela deux bagues de guidage sur l'axe supportant les disques, à jeu faible, et surtout, nous avons remplacé la liaison directe du moteur en porte-à-faux avec l'oxygénateur par un accouplement avec flexible, tout en fixant le moteur au bâti. L'extrémité du flexible comporte un logement où s'encastrent deux ergots fixés sur l'axe pour permettre la liaison en rotation. L'immobilisation relative en translation est assurée par un système vis-écrou molleté qui permet un montage et un démontage rapides.

Par ces procédés l'amplitude des vibrations est ramenée à une masse appliquée équivalente de $\approx \pm 15 \cdot 10^{-3}$ kg pour $v = 120$ tours /mm.

g) Filtrage électrique du signal parasite créé par les vibrations:

Pour atténuer la composante dynamique parasite, nous utilisons un filtre passe-bas parce que les fréquences des vibrations sont plus élevées que la fréquence des phénomènes à mesurer.

Dimensions :

Les vibrations forcées les plus basses sont de l'ordre de 1,5 Hz. (fondamentale pour 100 t/mm).

Nous avons employé deux filtres actifs de chez Analog Devices (Courbes comparatives fig. 11)

L'un codé 730 BT 1 à réponse de Butterworth

l'autre codé 730 LT 1 à réponse de Bessel

La fréquence de coupure s'ajuste entre 0,1 Hz et 20 Hz par adjonction de quatre résistances de valeurs égales telles que :

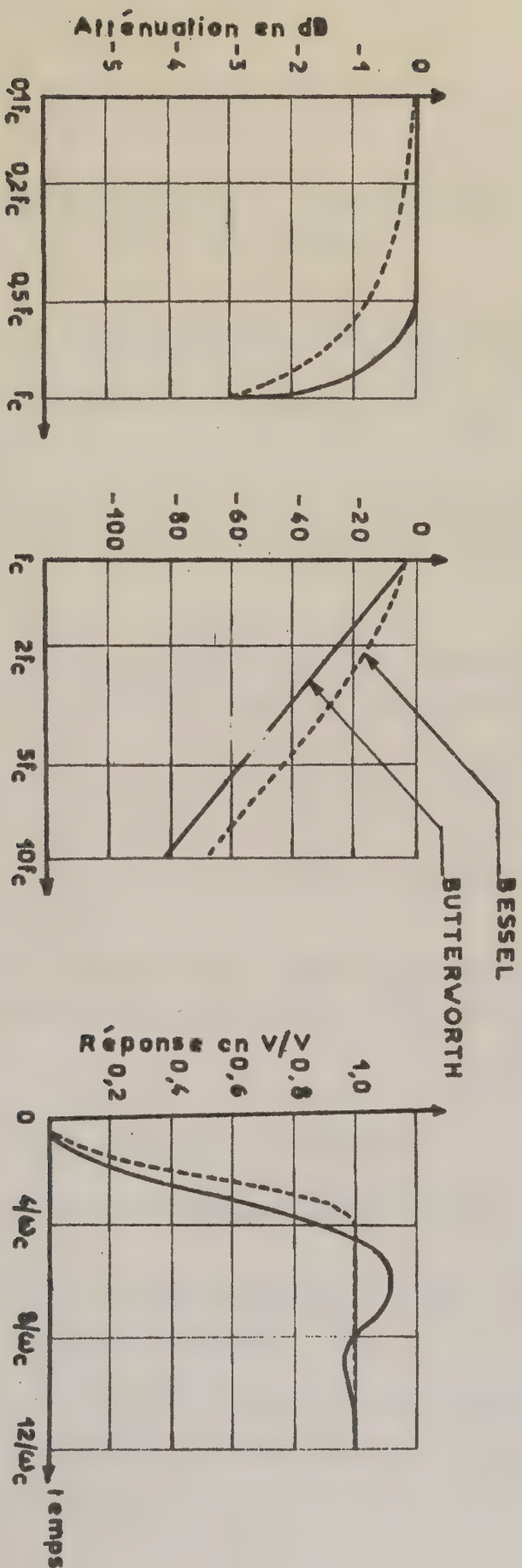
$$R(k\Omega) = 5 \left| \frac{20}{F_c} - 1 \right| \quad (17)$$

COURBES DE REPONSE DU FILTRE PASSE BAS BUTTERWORTH

- 730 BT1-ANALOG DEVICES-

ET DU FILTRE PASSE BAS BESSEL - 730 LT1-

FIG 11



ATTENUATION EN DB $= -20 \log_{10} \frac{\omega}{\omega_c}$

REPONSE A UN ECHELON

Chaque filtre a un gain unité, avec une réponse de Butterworth plus plate que celle de Bessel dans la bande passante.

L'atténuation au-delà de la fréquence de coupure (24 dB par octave) est un peu supérieure pour le Butterworth. Par contre la réponse à un échelon est plus raide et ne présente pas de phénomène d'overshoot pour le Bessel.

L'amplitude des vibrations induites équivalentes à $\pm 15 \cdot 10^{-3}$ kg doit être réduite à $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ kg pour une fréquence correspondant à une vitesse minimale de 60 tours/mm, soit de 1 Hz. L'atténuation du filtre doit être de 15 pour $F = 1$ Hz, ceci fixe F_c .

$20 \log 15 = 24$ dB. Il faut choisir la fréquence de coupure à une octave au moins au-dessous de la fréquence des vibrations forcées soit à $F_c = 0,5$ Hz.

On n'a pas intérêt à diminuer trop F_c parce que le temps de réponse et les dérives augmentent d'autant.

Avec $F_c = 0,5$ Hz (17) on a $R = 5 \left[\frac{20}{0,5} - 1 \right] \approx 2000 \text{ k}\Omega \approx 2 \text{ M}\Omega$ que l'on utilise le filtre 730 BT1 ou 730 LT1.

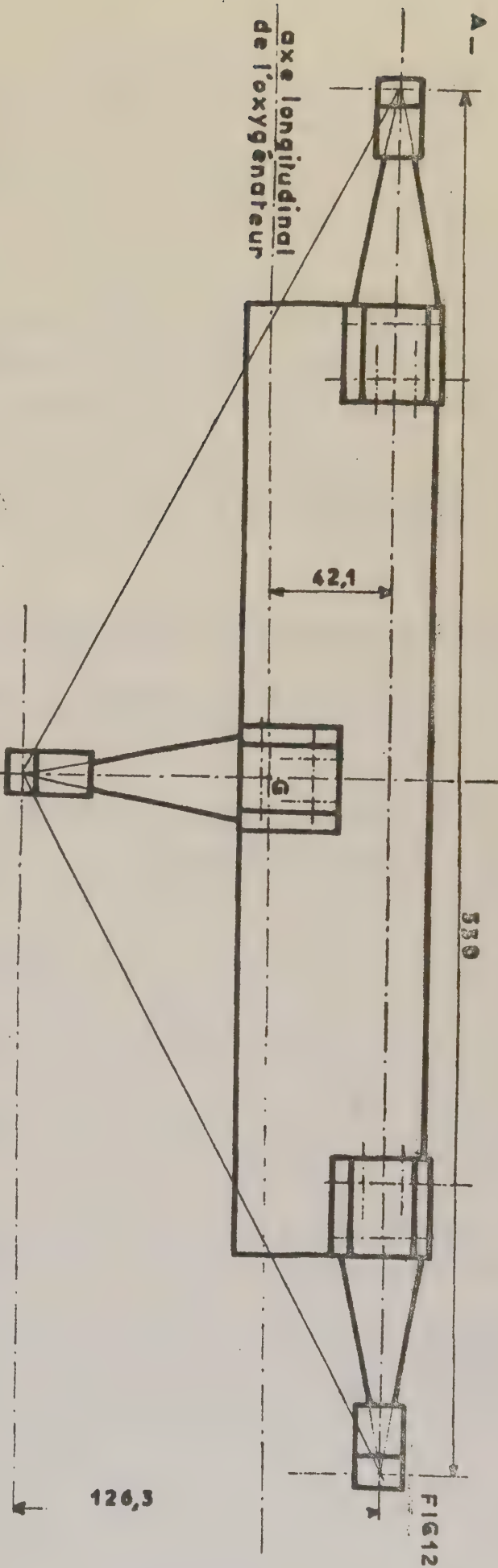
A l'extérieur de cette bande passante $[0, 0,5 \text{ Hz}]$, le bruit de fond est notablement affaibli, le signal de mesure pourra être amplifié pour l'attaque du servomoteur.

C - Liaisons des corps d'épreuve à l'oxygénateur

1) Plateau - Berceau - Plaque d'appui - Bille

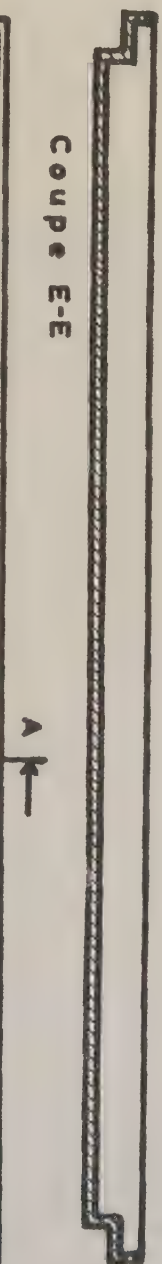
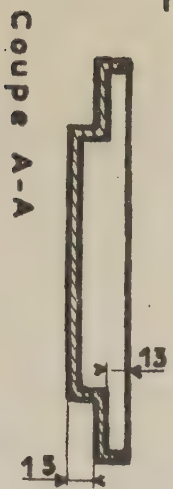
L'oxygénateur repose sur un plateau en acier inoxydable de 1,5 mm d'épaisseur que nous avons réalisé (fig. 12 B).

Ce support est placé sur un berceau sous lequel sont fixées trois plaques d'appui qui transmettent par leurs actions, le poids P de l'oxygénateur aux trois corps d'épreuve (fig. 11c).

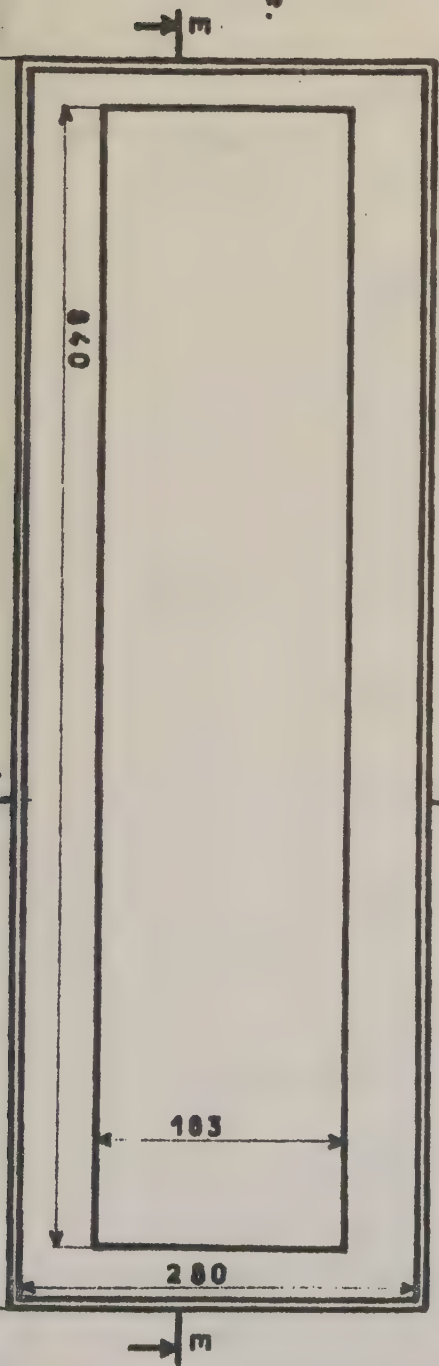


DISPOSITION DES CORPS D'EPREUVE

PLATEAU SUPPORT D'OXYGENATEUR



Matière: acier inoxydable.
épaisseur: 15/10



Il est très important que ces actions de contact soient bien positionnées sur les corps d'épreuve pendant la pesée : c'est la condition pour que le moment fléchissant $M = Fx$ (x représentant la distance de l'arête de la lame triangulaire à la section S) et par suite l'allongement ϵ_x , demeurent une fonction linéaire de la charge.

Les points d'application des charges sur les corps d'épreuve ont été parfaitement fixés par l'intermédiaire de billes de roulement en acier inoxydable, liées rigidement aux lames de cuivre au béryllium par de la colle araldite.

Les plaques d'appui sont en acier trempé, poli pour permettre aux billes en acier inoxydable de glisser sans frotter dans leurs logements quand la charge varie.

2) Positionnement des billes au sommet de la lame triangulaire (fig. 13A)

Nous allons montrer qu'il n'est pas impératif que F soit appliquée au sommet de la lame triangulaire.

Soit Δx la distance du point d'application de F (d) au sommet (s) de la lame. Le moment fléchissant dans une section située à l'abscisse x comptée à partir de (d) vaut $F(x + \Delta x)$ au lieu de Fx .

Δx est une constante pour une lame.

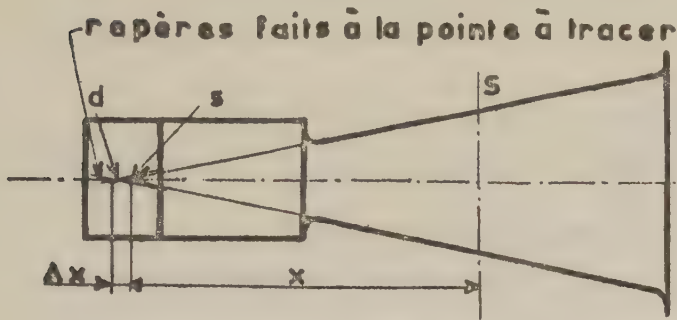
$$\text{On tire donc } \epsilon_x = \frac{F(x + \Delta x)}{E b} \frac{1}{x^3} \frac{1}{2x} \frac{12 e}{2x} = \frac{6Fl}{Ebe^3} \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)$$

On voit que l'allongement longitudinal du métal est toujours proportionnel à F ; il n'y a donc plus isoflexion puisque cet allongement dépend de x .

Le coefficient de proportionnalité k_x devient égal à $\frac{6l}{Ebe^3} \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)$. Il est constant pour une lame donnée (Δx fixé) et pour une jauge collée (x fixé)

Un faible déplacement du point d'application de F par rapport au sommet de la lame crée une variation du coefficient de proportionnalité, mais conserve le signal obtenu à partir des jauges, proportionnel à la charge.

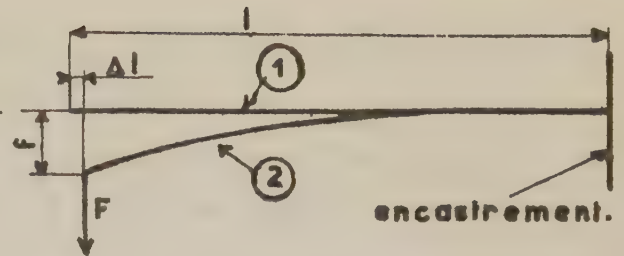
(A) POSITIONNEMENT DE F PAR RAPPORT AU SOMMET DU TRIANGLE



déplacement longitudinal de la table de fraiseuse.

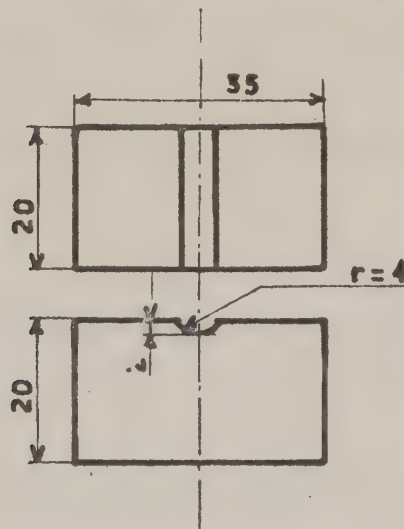
- s : sommet de la lame
- d : point réel d'application de F

(B) DEPLACEMENT DE d (FIG 13) AVEC UNE CHARGE $F=100N$.

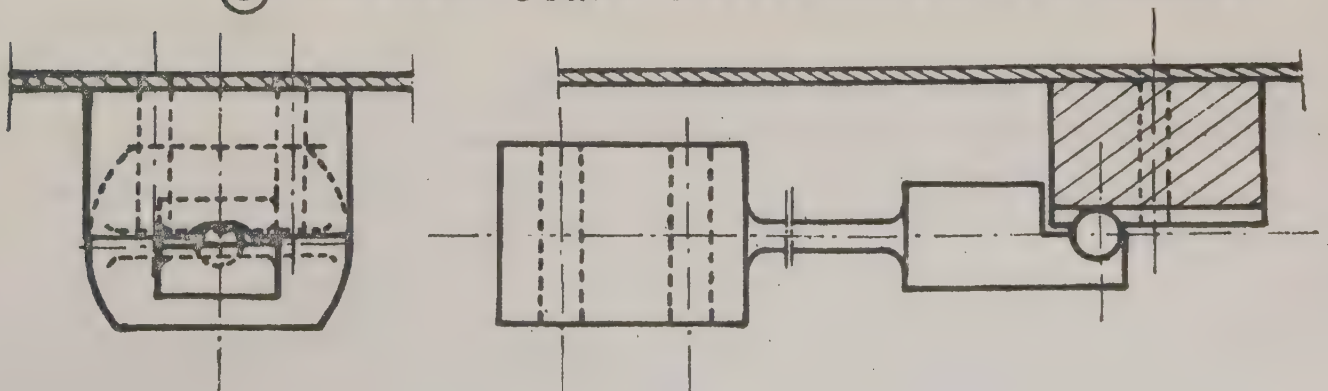


- 1 : ligne neutre avant charge.
- 2 : ligne neutre après charge.

(C) 3 PLAQUES D'APPUI EN ACIER TREMPE.



(D) LIAISONS CORPS D'EPREUVE-BERCEAU SUPPORT



Pour obtenir des sensibilités voisines pour les trois capteurs, le point (s) a été déterminé comme le montre la fig. 13 A.

Chaque côté de la lame triangulaire est positionné parallèlement au déplacement longitudinal de la table d'une fraiseuse.

La tête de cette machine comporte une pointe à tracer qui marque le prolongement de chaque côté. L'intersection de ces deux traits représente (s).

On perce alors le logement de la bille : (d) différent de (s) par suite des tolérances de traçage et de perçage.

3) déplacement de (d) vers l'encastrement

Nous avons montré que la flexion de la poutre était circulaire. La déformée avait un rayon de courbure constant pour (F) donnée :

$$R = \frac{EI}{M} = \frac{Ebe^3}{12 F l} \text{ d'où } R = \frac{e}{12 F} \cdot \frac{Ebe^2}{1} = \frac{3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 6}{12 \cdot 100 \cdot 10^{-5}} = 1,6 \text{ m avec } F = 100 \text{ N.}$$

Valeur de l'angle α inscrit interceptant cet arc déformé :

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2R} l$$

$$\alpha = 2^\circ 41' 9'' \rightarrow \log \sin \alpha = \overline{2},67080, \log R \sin \alpha = \overline{2},87492$$

$$\text{et } R \sin \alpha = 0,07497 \text{ m}$$

Le déplacement de (d) sous une charge de 100 N dans la direction x'x est donc de 0,03 mm. ($3 \cdot 10^{-5}$ m)

Chaque bille doit pouvoir se mouvoir de 0,03 mm dans la direction de l'axe neutre et vers l'encastrement à l'intérieur de la rainure de chaque plaque d'appui.

Ce déplacement s'effectue librement sur le montage représenté fig. 13 D, qui de plus assure un positionnement facile du plateau support placé sur les corps d'épreuve.

Erreur systématique maximale introduite par le déplacement de (d) :

Nous avons considéré que le moment de F par rapport à une section d'abscisse x (x représentant la distance de (d) à la section S (Fig. A)) était Fx ; mais sous l'effet de F, la poutre se déforme. La longueur de l'axe neutre ne varie pas mais le bras de levier de F ne reste pas x ; il diminue.

Cette diminution est maximale entre (d) et l'encastrement quand la force est maximale ; soit 100 N (fig. 13 B)

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta l}{l} \quad \text{soit} \quad \frac{\Delta \epsilon x}{\epsilon x} = \frac{\Delta l}{l}$$

Δl est la valeur calculée précédemment pour le déplacement de (d)

$$\text{Donc} \quad \frac{\Delta \epsilon x}{\epsilon x} = \frac{3}{100 \cdot 75} = \frac{4}{10\,000}$$

Cette erreur systématique inférieure à $\frac{4}{10\,000}$ ne nous gêne pas dans notre pesée. Nous n'en tiendrons compte que si l'on recherche une précision supérieure à 2500 sur toute l'échelle de mesure.

D - Jauges

(pour information consulter les notices des fabricants 17-18-19 et 20)

Ceux-ci organisent des stages sur la mise en oeuvre des jauges et des colles.

Les jauges représentent l'élément T_2 choisi, sur le diagramme de la figure (2)

Leurs déformations reproduisent fidèlement dans une direction celles de la surface du corps d'épreuve sur laquelle elles sont collées ¹⁷.

Ces variations de longueur créent des variations de résistance qui leur sont proportionnelles. Le facteur de proportionnalité ou facteur "K" de jauge est tel que :

$$\frac{dR}{R} = k \quad \frac{dl}{l}$$

1) Caractéristiques des jauges utilisées

Nous employons des jauges :

- à trame pelliculaire et non à fil.

La mise en oeuvre du dépôt de constantan, sous forme d'une couche très mince (film 50 fois plus large qu'épais), sur un support phénolique relève de la technique des circuits imprimés.

Ces jauges Philips de type PR 9834 K/05SE sont compensées (IV-C-3) pour un métal dont le coefficient de dilatation est de 17.10^{-6} (symbole s dans la désignation) en particulier pour U.Be2.

Leur déformation résiduelle sur une telle structure est :

$$\epsilon_s = 0 \pm 1,5 \text{ } \mu\text{m/m et par } ^\circ\text{C.}$$

Elles possèdent des "électrodes" (symbole E dans la désignation) qui permettent de les souder aux fils de liaison

- de résistances nominales : $301 \text{ } \Omega \pm 0,25 \%$

Nous avons groupé les résistances les plus voisines par quatre pour obtenir une plus grande symétrie dans le montage, ceci afin de réaliser facilement le zéro par équilibrage, en évitant les dérives thermiques.

Notons que les précontraintes de collage modifient les valeurs de ces résistances, il faut donc prendre des précautions pour égaler ces variations (voir IV-D-2)

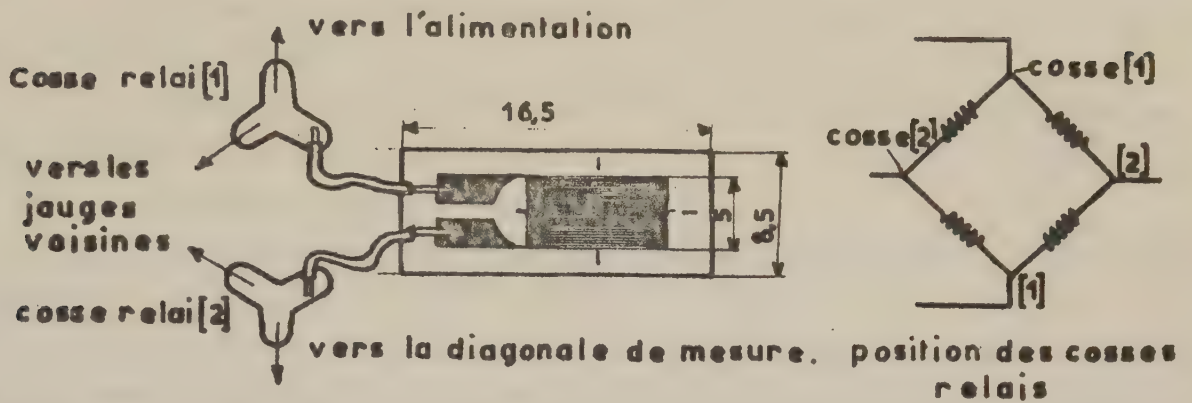
- de facteur de jauges $k = 2,04 \pm 1 \%$

La précision de 100, sur le facteur de jauge, est nécessaire en extensométrie puisqu'elle conditionne la précision sur les mesures des contraintes. Dans le cas d'une pesée, seul l'ordre de grandeur de k importe pour les calculs de tension de sortie e_v .

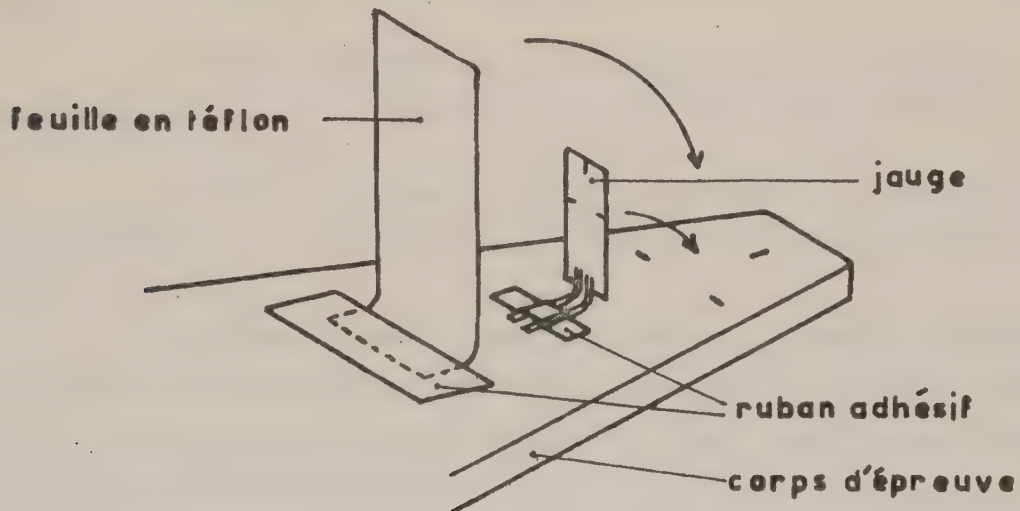
k détermine initialement les sensibilités des trois capteurs, mais celles-ci seront ajustées par la suite en faisant varier la tension d'alimentation.

DIMENSIONS D'UNE JAUGE PHILIPS : PR 9834 K05 SE

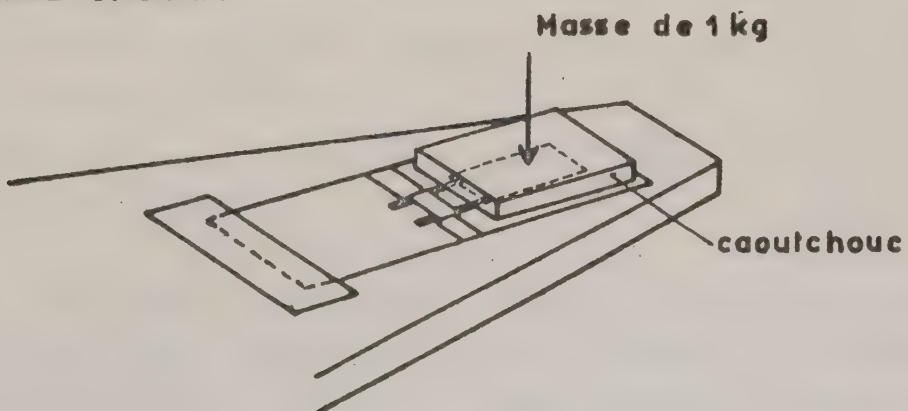
UTILISATION DES COSSES RELAIS :



MISE EN PLACE D'UNE DES JAUGES:



COLLAGE D'UNE JAUGE:



- dont le support isolant mesure $(16,5 \times 8,5) \text{ mm}^2$ et la grille $(4,1 \times 5) \text{ mm}^2$. (Fig. 14)

Il faut coller deux jauges et les fils de compensation de chaque côté de la lame triangulaire.

Les plus grandes surfaces de support et de grille compatibles avec les dimensions de la lame ont été choisies.

L'adhérence est meilleure.

Les puissances électrique et thermique dissipées pourront être supérieures.

La Société HBM recommande ²¹ pour obtenir une excellente précision, une puissance électrique de $0,3 \text{ W/cm}^2$ à $0,8 \text{ W/cm}^2$ de grille sur le cuivre pour des jauges à trame pelliculaire qui évacuent mieux la chaleur que les jauges à fil.

On pourra donc pour une section de $0,2 \text{ cm}^2$ dissiper $0,3 \times 0,2 = 0,06 \text{ W}$ dans les grilles dont on dispose, soit $U = \sqrt{PR} = \sqrt{0,06 \cdot 300} \approx 4 \text{ V}$ par jauge.

La tension d'alimentation E_v pourra être 8 V. Une tension d'alimentation supérieure à 5 V serait supportable par les capteurs sans perte de précision.

Les études de dérive pour des tension E_v variant entre 4 V et 10 V ont montré que pour une même variation de température comprise entre 20 et 30°C la variation de tension de dérive e_{VD} était proportionnelle à la tension d'alimentation (voir figure 16).

Pour une charge donnée sur le capteur, la tension de sortie e_v est aussi proportionnelle à E_v .

Le rapport e_{VD}/e_v reste constant quand E_v varie entre 4 et 10 V. Il n'y a pas de perte de précision.

- La linéarité des jauges est meilleure que 1/1000 sous 1000 μD , valeur maximale de la déformation utilisée.

- Durée de vie : 10^7 cycles sous $\pm 1000 \mu\text{D}$.

- Isolement : les jauges de résistances voisines (mesurées par un montage en pont) sont placées côte à côte dans le montage définitif pour augmenter sa symétrie. Si elles sont mal isolées par rapport au corps d'épreuve, la résistance d'une branche ne sera plus R mais $R_E = \frac{R_i R}{R_i + R}$ où : R_i représente la résistance d'isolation

R_E représente la nouvelle

résistance de la branche et $\frac{\Delta R_E}{R_E} = \frac{R_i}{R_i + R} \frac{\Delta R}{R}$.

La variation relative de résistance sera diminuée dans le rapport $\frac{R_i}{R_i + R}$. Pour une pesée, on ne calcule pas, comme en extensométrie une contrainte à partir d'un $\frac{\Delta R}{R_i}$. La mesure d'isolement, moins importante, demeure nécessaire si on veut maintenir les symétries et les sensibilités des montages.

La résistance d'isolement de chaque jauge collée, mesurée avec un mégohmmètre HBM fonctionnant sous faible tension de type TM1T, vaut en moyenne $5 \cdot 10^3 M \Omega$

2) Fixation d'une jauge sur le corps d'épreuve

- Préparation des surfaces.

Nous rendons rugueuse la surface du corps d'épreuve par frottement au papier émeri jusqu'à obtention de rayures entrecroisées qui permettront une excellente adhérence de la jauge sur le support.

La position de la jauge est repérée par trois traits fins tracés sur la surface du corps d'épreuve qu'on nettoie avec du coton imbibé de trichloréthylène jusqu'à ce que les tampons restent absolument propres.

La zone de collage de la jauge est également nettoyée au trichloréthylène.

- Mise en place de la jauge (fig. 14 B)

La jauge, tenue par ses fils de sortie à l'aide de brucelles, est placée sur la surface en position correcte grâce aux repères. En fixant les pattes de sortie à l'éprouvette, un ruban adhésif maintient la position.

Nous déposons une mince couche de colle à durcissement rapide de type PR 9247 uniformément sur le côté à coller de la jauge.

La jauge est alors rabattue sur la surface de l'éprouvette par l'intermédiaire d'une feuille en téflon.

On chasse les bulles d'air en déplaçant un doigt d'une extrémité à l'autre de la jauge.

Les précontraintes de collage sont maintenues constantes sur toutes les jauges par application d'une masse de 1 kg, par l'intermédiaire d'une plaque en caoutchouc qui répartit la charge. (fig. 14 C)

Ces précautions indispensables évitent les instabilités dues aux mauvais collages, aux glissements des jauges sur leur support.

- Liaisons des jauges aux fils de câblage (figure 14 A)

Nous utilisons des plaquettes raccordement de type PR9245/05 isolantes, collées comme les jauges, munies d'électrodes à souder, pour éviter la détérioration des connexions de sortie de la jauge par les fils de liaison soumis accidentellement à des efforts de traction.

3) Compensations des dérives introduites par des variations de de température sur les montages en pont des jauges métalliques sans charge

a) *Etude théorique*

- Variation de résistance du fil de jauge seul

La jauge est un fil résistant. Sa résistance est donnée par la loi $R = \frac{\rho_f l}{S}$, $R = \frac{\rho_f l^2}{V}$ avec $V = \pi r^2 l$ $\frac{d\rho_f}{\rho_f} = c \frac{dV}{V}$ (variation de résistance proportionnelle à la variation de volume - hypothèse de Bridgman utilisable pour les jauges à fil ou à trame pelliculaire).

$$D'où \quad \frac{dR}{R} = c \left(\frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} \right) + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r}$$

Si α_f représente le coefficient de dilatation linéaire du fil, identique dans toutes les directions $\left(\frac{dr}{r}\right)_{dt^\circ} = \left(\frac{dl}{l}\right)_{dt^\circ} = \alpha_f dt^\circ$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dr}{r} (c - 1) + \frac{dl}{l} (c + 1) = \frac{dl}{l} (3c - 1) = \alpha_f dt^\circ (3c - 1)$$

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_{dt^\circ} = \alpha_f (3c - 1)_{dt^\circ} \text{ où } \left(\frac{dR}{R}\right)_{dt^\circ} \text{ est la variation relative de résistance du fil pour un accroissement de température de } dt^\circ$$

- Variation différentielle de longueur du fil de la jauge et du matériau sur lequel elle est collée. ²²

Sous l'effet d'une variation de température, le fil de la jauge subit une dilatation : $dl_f = l_t \alpha_f dt$:

Sous cette même variation, le métal subit l'allongement $dl_m = l_t \alpha_m dt$. D'où un allongement différentiel qui va se répercuter sur le fil de jauge :

$dl' = dl_m - dl_f = l_t (\alpha_m - \alpha_f)$. Cet allongement va entraîner une deuxième variation de résistance :

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dl'}{l_t} = k(\alpha_m - \alpha_f) dt^\circ$$

La variation globale de résistance du fil de jauge est donc :

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_{\text{total}} = \alpha_f (3c - 1) + k (\alpha_m - \alpha_f) dt^\circ$$

En fonction de la variation de température, la variation relative de résistance de jauge sera proportionnelle au terme

$$\alpha_f(3c - 1) + k(\alpha_m - \alpha_f) \quad (18)$$

Le terme $\alpha_f(3c - 1)$ est une donnée dépendant du coefficient de dilatation du métal constituant la jauge, le terme $k(\alpha_m - \alpha_f)$ dépend du métal constituant la jauge (α_f) et de α_m , donc du métal constituant le corps d'épreuve.

b) Intérêt du résultat

Il prouve que l'effet de la température sera d'autant plus important sur la variation de résistance que le facteur k sera grand.

Les jauges métalliques ont un coefficient k voisin de 2 ; les jauges semiconductrices au silicium ont un facteur k de l'ordre de 100. Pour un même $(\alpha_m - \alpha_f)$ différent de 0, elles sont donc, en ne tenant pas compte du coefficient $\alpha_f(3c - 1)$ cinquante fois plus sensibles à la température que les jauges normales.

Les jauges semiconductrices seront utilisées pour des mesures instantanées de contraintes faibles. Elles sont à déconseiller pour des mesures de longue durée.

Si l'on arrive à annuler ce coefficient (18) dépendant du métal constituant la jauge et du métal du corps d'épreuve, la variation de résistance avec la variation de température devient théoriquement nulle.

- Choix des jauges. Déformations résiduelles

Dans le montage définitif, nous avons obtenu à la société PHILIPS des jauges compensées pour une dilatation linéaire du cuivre au béryllium (égale à celle de l'acier inoxydable) de $17.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Ces jauges sont en constantan pour lequel la valeur de α_f est ajustée par recuit.

Collées sur un métal ayant un coefficient de dilatation $\alpha_m = 17.10^{-6}$, leur déformation résiduelle est de $0 \pm 1,5 \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ soit de $0 \pm 1,5 \mu\text{D}/^{\circ}\text{C}$. Cette valeur résulte de la dispersion des coefficients de température des jauges d'une même boîte.

Cette déformation résiduelle maximale correspond d'après (15) à une masse fictive appliquée en (d) de $m = 10^{-2} \cdot 1,5 \text{ kg}$ soit 15 grammes pour une variation de température de 1°C .

Ce résultat nous oblige à prévoir expérimentalement un deuxième type de compensation.

Cette déformation crée une variation de résistance donc une dérive dans la diagonale d'un pont à une jauge active. La tension de dérive correspondante, pour une tension d'alimentation du pont de 4 V est

$$e_D = \frac{3}{4} 10^{-6} \text{ V/}^\circ\text{C} = \frac{3}{4} \mu\text{V/}^\circ\text{C} \text{ soit } e_D = \frac{3}{4} \mu\text{V/V alimentation } ^\circ\text{C}.$$

Ces équivalences nous permettent d'exprimer l'effet d'une variation de température de l'ensemble corps d'épreuve + jauges, en déformation résiduelle (μD), en masse fictive appliquée, en tension de dérive apparaissant dans la diagonale du pont.

Position des jauges (Fig. 15 B)

Dans un montage en pont équilibré pour des valeurs R_i ($i = 1, \dots, 4$) des résistances des jauges J_i , représentées sur le schéma III, le signal de sortie est :

$$e_v = \frac{E_v}{4} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right)$$

si les dR_i sont les variations des résistances R_i

Une même variation $\frac{dR}{R}$ de deux jauges voisines dans le pont (1,2-3,4) donne un signal nul. Cette même variation sur deux jauges opposées (1,3-2,4) crée un signal proportionnel à $\left| 2 \frac{dR}{R} \right|$

Pour une tension E_v fixée, e est maximum si $\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4}$ est maximum, soit si J_1 et J_3 travaillent à la traction longitudinale et J_2 et J_4 à la compression longitudinale (montage II).

Avec le schéma II, une même augmentation de température ΔT° sur les deux faces entraîne :

$$dR_1 \approx dR_2 \approx dR_3 \approx dR_4 \quad \text{et} \quad \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \text{ tend vers } 0.$$

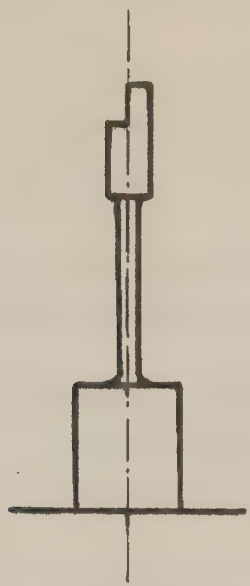
Le montage lui-même est compensateur.

Mais si un gradient de température ΔT° apparaît entre la face supérieure et la face inférieure de II : $dR_1^\uparrow$, $dR_3^\uparrow$, alors que $dR_2 = dR_4 = 0$ (face inférieure). La dérive est amplifiée.

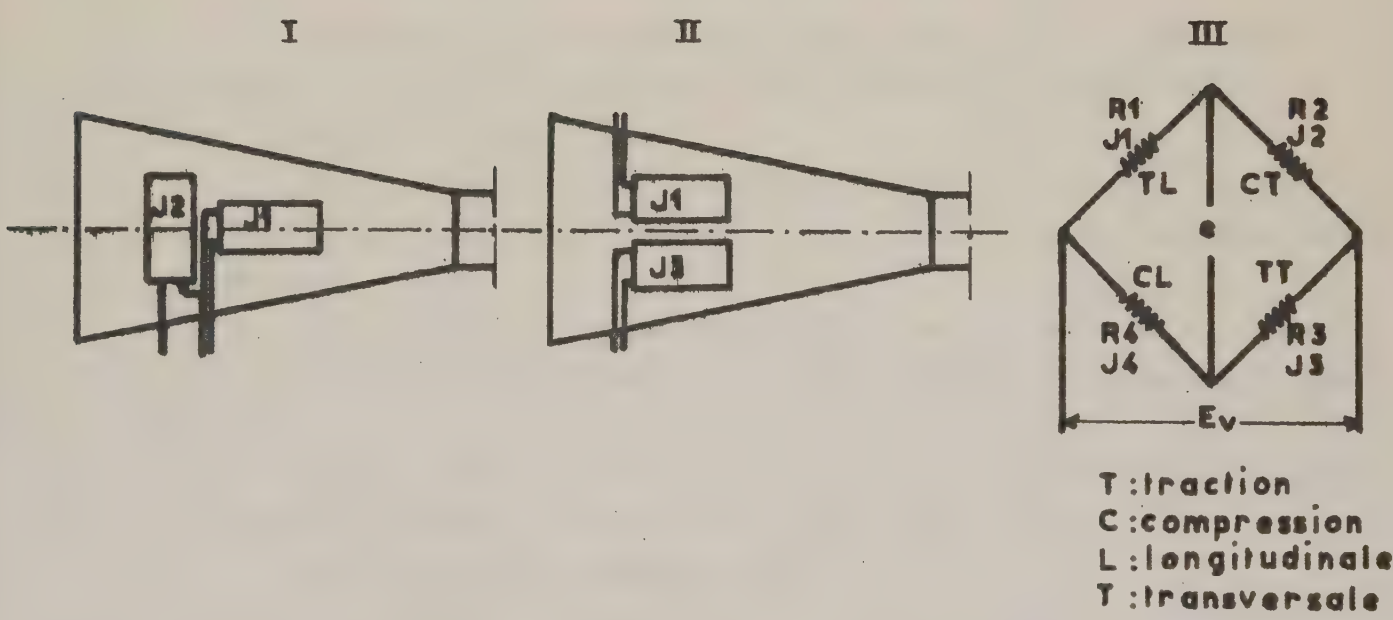
Le montage I présente l'avantage d'être compensateur pour cet effet. Deux jauges proches l'une de l'autre subissent la même variation de température donc de résistance dans deux branches voisines du pont.

A. MONTAGES UTILISES POUR LA COMPENSATION DES DERIVES : FIG 18

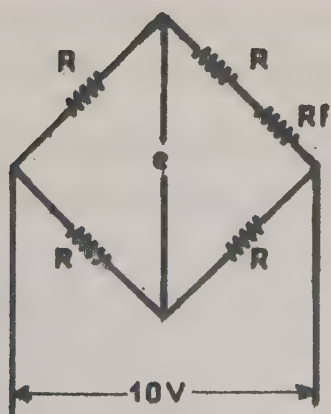
Position du corps d'épreuve dans l'étuve pour la mesure des dérives :



B. Position des jauges sur le corps d'épreuve:



C. Mesure de résistance du fil avec le pont d'extensométrie:



Sous l'effet des contraintes, toutes les jauges subissent, dans le montage II, la déformation maximale, alors que dans I les jauges transversales (2 et 4) subissent une déformation :

$$D_T = \nu D_L \quad \text{où } \nu \text{ est le coefficient de Poisson du métal} \\ = 0,34 \text{ pour le cuivre au béryllium.}$$

Le montage à quatre jauges I, bien que $4/2,68 = 1,5$ fois moins sensible que II a été retenu. Il annule l'effet d'une augmentation uniforme de température sur les faces 1 et 2 de (L), ou d'un gradient de température existant entre ces mêmes faces.

c) Nécessité de l'utilisation de jauges compensées

Pour des jauges compensées de coefficient $\alpha_f = (17 \pm 1,5) 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ les variations relatives de résistance qui s'annulent par différence sont de l'ordre de $3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. (cas C_1)

Pour des jauges ayant un coefficient α_{fl} du fil de $(23 \pm 1,5) 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ elles peuvent atteindre $(24,5 - 17) 10^{-6} \cdot 2 = 15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ mais s'annulent toujours par différence. (Cas C_2)

Si par contre, la jauge J_1 est portée sur la face 1 à la température $T + \Delta T$, J_2 restant à la température T , il faut utiliser des résistances compensées.

J_1 et J_2 étant voisines, en considérant $\Delta T = 1/30^{\circ}\text{C}$ dans un cas (C_1) la déformation résiduelle maximale est de $\frac{1,5}{30} = \frac{1}{20} \mu D$. (0,5 g)

Dans l'autre (cas C_2), elle devient :

$$\frac{24,5 \cdot 10^{-6} - 17 \cdot 10^{-6}}{30} = \frac{5}{20} \mu D, (2,5 \text{ g}) \text{ soit cinq fois plus grande que dans } (C_1).$$

C'est pour minimiser la dérive due à un gradient de température qui peut apparaître entre les deux jauges d'une même face qu'il faut utiliser des jauges compensées sur notre montage en pont complet.

d) Détermination expérimentale des valeurs de dérive, sans charge appliquée, compensations obtenues sur deux montages d'étude.

Deux jauges à trame pelliculaire de type PR 9832 K 25 AE compensées pour un coefficient $\alpha_m = 23 \cdot 10^{-6}$ sont collées sur une éprouvette en U-Be 2

beryllium ayant $\alpha_m = 17.10^{-6}$. La valeur nominale de leur résistance est de 600 Ω . Elles sont montées en demi-pont. Le montage en pont complet est réalisé par l'intermédiaire de deux résistances fixes incorporées au pont d'extensométrie. La lame étant chargée, une jauge travaille en traction longitudinale (J_1), l'autre (J_2) en compression longitudinale.

Un tel montage ne compense pas les dérives introduites par les variations des résistances dues à un gradient de température entre les deux faces de la lame. Pour éviter qu'un tel gradient de température ne se produise, l'éprouvette sera maintenue dans l'étuve comme le montre le schéma (A) de la fig. 15.

La dérive que nous allons mesurer $e_{vD} = \frac{E_v}{4} \left| \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \right|$ proviendra d'un accroissement différentiel de résistance relative entre R_1 et R_2 .

L'alimentation se fait sous 10 V. Pour le repérage de la température de la pièce, nous utilisons un thermocouple PHILIPS collable comme les jauges, ayant le même support en cuivre constantan de type PR 6452 A 00. La soudure froide plonge dans un vase de Dewar rempli de glace fondante. L'instrument de mesure de tension est un galvanomètre AOIP 6321.

La sensibilité du voltmètre numérique branché à la sortie du pont est de 1 mV par digit. Cette sortie "tension" correspond à une tension e_v multipliée par 10^4 . On peut donc considérer qu'on lit :

$$1.10^{-4} \text{ mV} = 0,1 \text{ } \mu\text{V par digit}$$

Ce voltmètre est utilisé parce que la lecture sur le galvanomètre à cadran associé au pont n'est pas commode.

La température maximale à l'intérieur de l'étuve de 36°C est maintenue pendant une heure. Les mesures sont faites au refroidissement pour obtenir un équilibre thermique entre les différents éléments (jauges, corps d'épreuve, air ambiant dans l'étuve).

La même méthode et les mêmes instruments seront utilisés sur les montages définitifs.

- Résultats expérimentaux

Une première série de mesures met en évidence des domaines à l'intérieur desquels il existe une excellente linéarité. Les points de décrochements étaient dus à des variations du 0 du galvanomètre AOIP. Ils sont éliminés dans une deuxième série de mesures en intervertissant les bornes et en faisant une

moyenne des valeurs lues. Ces deux courbes mettent en évidence une dérive de 40 μV pour 10°C dans le domaine de températures 20°C à 35°C, soit 4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ pour une tension d'alimentation de 10 V. (Fig. 16, Courbe 1)

Ces 4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ correspondent à une différence de variations des résistances de jauges de $\Sigma \frac{\Delta R}{R} = \frac{4}{10} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ (19) qui correspond à une masse fictive m appliquée donnée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = \frac{k \cdot 6 \cdot m g l}{E b e^2}, \text{ avec } \frac{\Delta R}{R} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ soit } \frac{\Delta l}{l} = 0,4 \cdot 10^{-6}$$

d'où :

$$m = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{E b e^2 \cdot l}{1 \cdot 6 \cdot k \cdot g} = \frac{0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 \cdot 6}{2,9,81 \cdot 6} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}/^\circ\text{C}$$

D'après la remarque (C)₂, compte tenu des coefficients de dilatation respectifs du fil de jauge et du cuivre au béryllium :

$\frac{dR_1}{R_1} \approx \frac{dR_2}{R_2} = k \frac{dl}{l} = 2 \cdot (23 \cdot 10^{-6} - 17 \cdot 10^{-6}) = 12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ aux incertitudes près sur le coefficient $23 \cdot 10^{-6}$, soit $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$ pour les jauges d'une même boîte. D'où

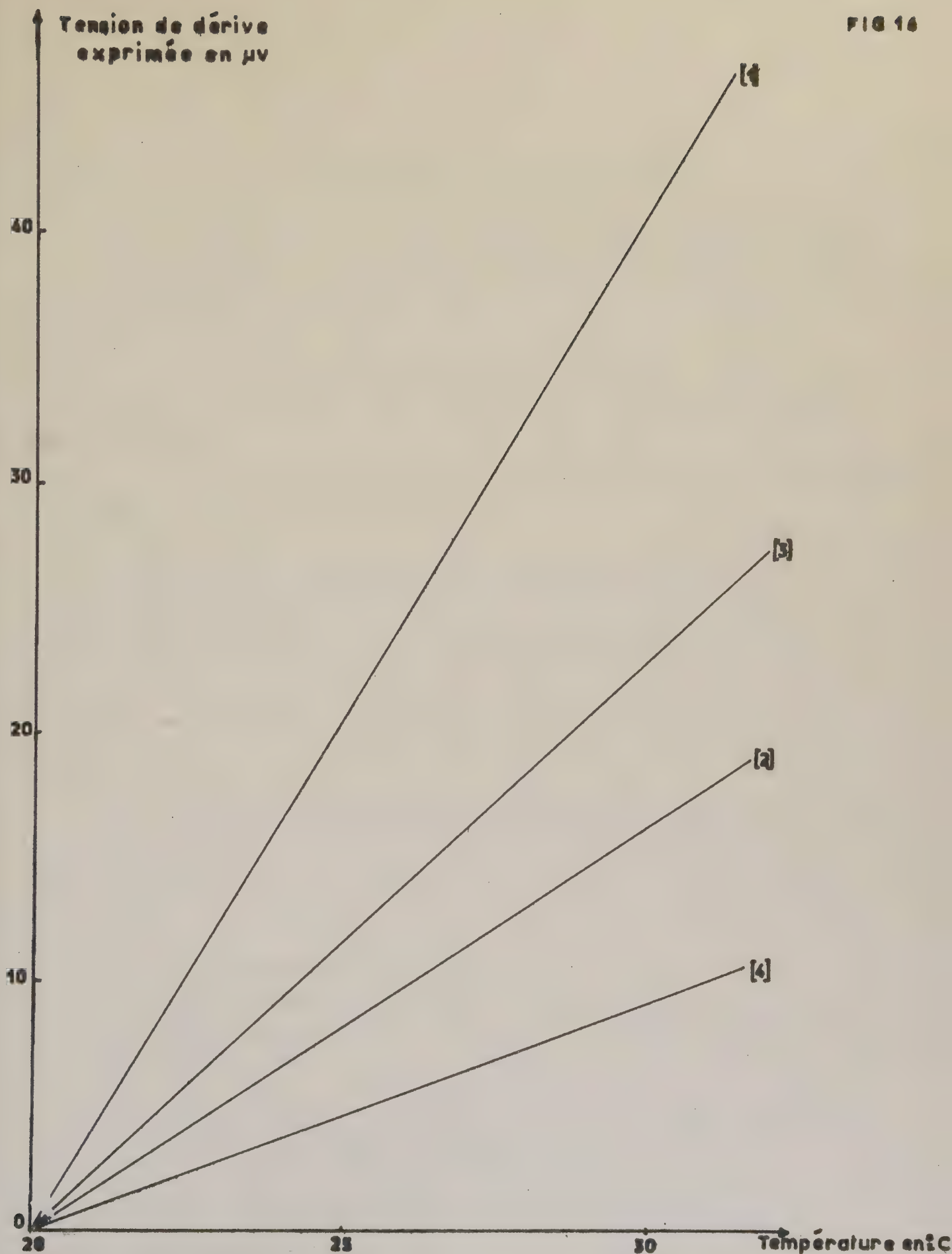
$$\left| \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \right|_{\text{maximum}}/^\circ\text{C} = 3 \cdot 10^{-6}$$

Expérimentalement, la variation différentielle de résistance par degré est : $1,6 \cdot 10^{-6}$ et $1,6 \cdot 10^{-6} < 3 \cdot 10^{-6}$ pour les jauges non compensées montées sur le cuivre au béryllium.

et : $0,96 \cdot 10^{-6} < 3 \cdot 10^{-6}$ pour les jauges compensées montées sur aluminium.

Notons que la valeur inférieure obtenue sur la lame en aluminium ne résulte pas de l'utilisation des jauges compensées, comme nous l'avons montré, mais du choix de deux jauges dont les coefficients de température étaient plus proches sur l'aluminium que sur le cuivre au béryllium.

Les mêmes expériences reprises avec une tension d'alimentation de 4V (graphes 2 et 4) mettent en évidence une dérive 2,5 fois plus petite.



MONTAGE A 2 JAUGES NON COMPENSEES SUR LAME EN U-Be2

MONTAGE A 2 JAUGES COMPENSEES SUR LAME EN AZO

[1] $E_v = 10\text{V}$
 [2] $E_v = 4\text{V}$
 [3] $E_v = 10\text{V}$
 [4] $E_v = 4\text{V}$

- Calcul des résistances de compensation

Soit δ la variation différentielle de résistance relative obtenue expérimentalement avant la compensation, par degré de variation de température. δ se détermine à partir de la tension de dérive par degré de variation de température $\delta = \frac{(e/^{\circ}\text{C})}{E_v} 4$

Après compensation nous voulons obtenir $\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} = 0$ pour un montage à deux jauges et $\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} = 0$ pour un montage à quatre jauges.

Si nous introduisons une résistance r_{ct} variant avec la température dans une branche convenable du pont,

$$\delta = \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \quad \text{avant compensation et par degré} \quad (20)$$

$$0 = \frac{dR_1}{R_1} - \frac{d(R_2 + r_{ct})}{R_2 + r_{ct}} \quad \text{après compensation et par degré} \quad (21)$$

$$(21) - (20) \text{ entraîne } \delta = \frac{dR_2 + r_{ct}}{R_2 + r_{ct}} - \frac{dR_2}{R_2} \approx \frac{d r_{ct}/dt}{R_2 + r_{ct}}$$

si la valeur de r_{ct} est faible devant celle de R_2 .

Si nous réalisons cette résistance en fil de cuivre $\frac{dr_{ct}}{dt} = r_{ct} \alpha_c$ avec

$$\frac{dr_{ct}}{dt} = R_2 \delta \quad r_{ct} = \frac{R_2 \delta}{\alpha_c} \quad (22)$$

R_2 est la résistance d'une branche du pont

δ valeur obtenue expérimentalement à partir de e_{vD}
 $\alpha_c = \frac{4}{1000}$ d'après le Handbook ²³ pour le cuivre dans le domaine des températures (18°C-30°C)

(19) et (22) $\rightarrow$ si $R_2 = 600 \Omega$; $\delta = 16.10^{-7}$ sur la lame en cuivre au béryllium

$$r_{ct} = \frac{600 \cdot 16.10^{-7} \cdot 10^3}{4} = 0,24 \Omega$$

$$R_2 = 600 \Omega, \delta = 9,6.10^{-7} \text{ sur la lame en aluminium}$$

$$r_{ct} = \frac{600}{4} \cdot 10^3 \cdot 9,6.10^{-7} = 0,14 \Omega$$

- Réalisation et montage de ces résistances

Nous choisissons du fil de cuivre à un seul brin. Nous mesurons sa résistance avec le pont PHILIPS PR 9307 pour une longueur de 0,30 m. Le fil incorporé dans une branche du pont de Wheatstone préalablement équilibré, crée un déséquilibre que l'on mesure comme le montre le schéma c de la fig. 15.

Nous obtenons sur la sensibilité 5mV en bout d'échelle une valeur e_v de 2,7 mV sous une tension d'alimentation de $E_v = 10$ V.

La résistance du fil vaut donc $R_f = 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot \frac{4}{10} = 0,65 \Omega$ pour 0,30 m de fil.

Longueur du fil à utiliser :

0,11 m	sur la lame en cuivre au béryllium
0,06 m	sur la lame en aluminium

La compensation sera d'autant plus effective que le fil de cuivre et le fil de jauge auront une température plus voisine. Nous avons pour cela collé le fil de cuivre près du fil de jauge sur un support phénolique identique (supports d'anciennes jauges) ; ces supports étaient collés dans les mêmes conditions sur la lame.

- Résultats obtenus sur les lames A.B.C. utilisées sur le montage final (fig. 17)

Chaque lame comporte un montage en pont de Wheatstone à quatre jauges actives compensées sur le cuivre au béryllium : deux jauges longitudinales et deux transversales. La tension d'alimentation est de 4V.

Les expériences de dérives du zéro sont refaites dans les mêmes conditions que pour le montage préliminaire.

Les formules suivantes déjà explicitées seront utilisées :

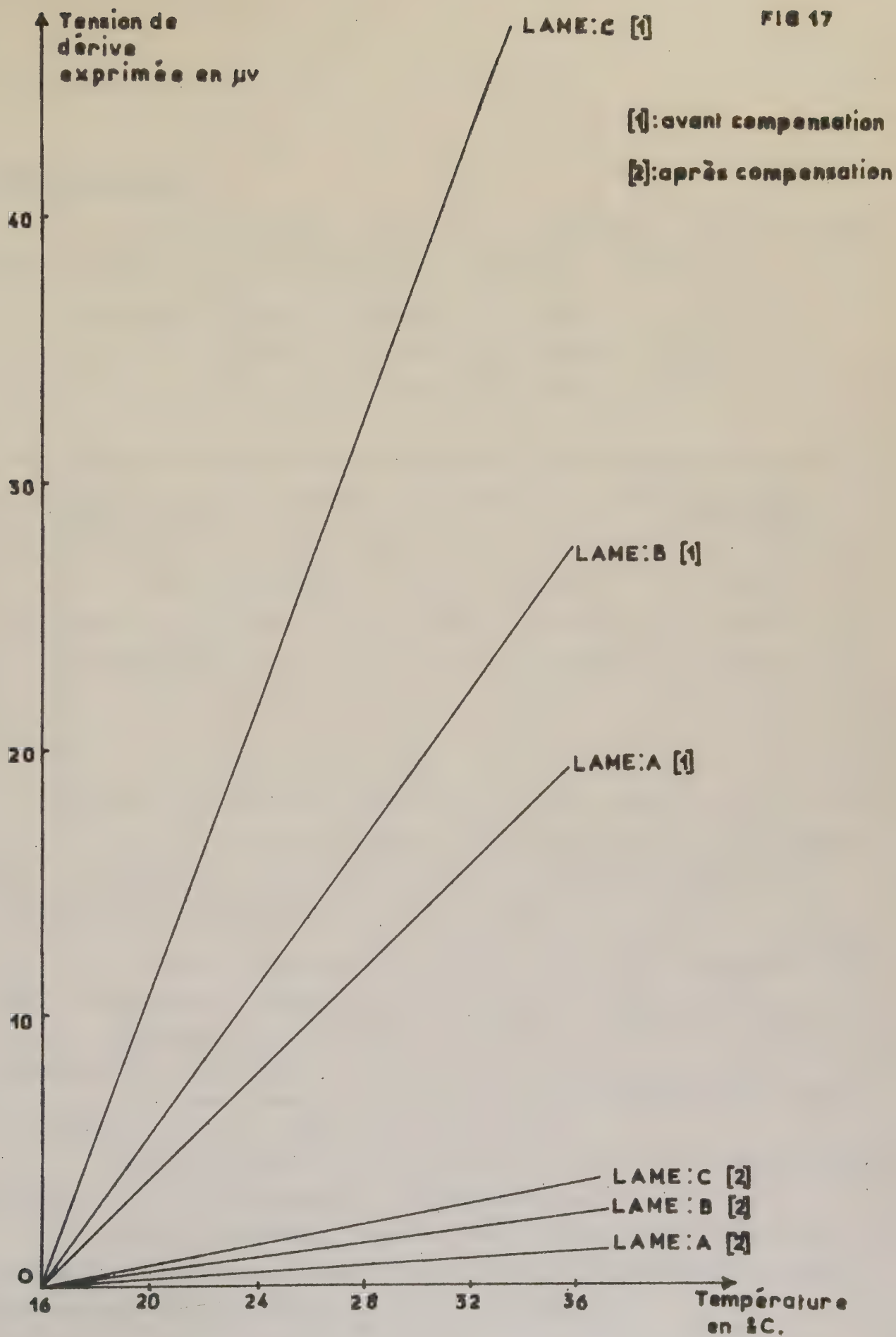
$$\delta = 4 \frac{e_{vD}}{E_v} = e_{vD} \text{ si } E_v = 4V.$$

. masse fictive appliquée correspondante en kg : $m = 10^{-2} \frac{\Delta l}{1}$ où $\frac{\Delta l}{1}$ est exprimé en microdéformations.

$$\cdot \frac{\Delta l}{1} = \frac{1}{5,36} \delta \text{ pour un montage à quatre jauges.}$$

$$\text{d'où} \quad m = 1,87 \cdot 10^{-3} e$$

$$\cdot r_{ct} = \frac{R_2 \delta}{\alpha_c} = \frac{300 \cdot 10^3}{4} \delta = 0,075 \cdot 10^6 \delta$$



DERIVES DU ZERO DES CAPTEURS AVEC LA TEMPERATURE

SANS CHARGE_MONTAGE A QUATRE JAUGES - $E_v = 4\text{V}$ - $R = 300\Omega$

Avant-compensation

La tension de dérive étant ramenée arbitrairement à 0 pour une température initiale de 16 C, les courbes nous permettent de conclure :

Dérive de e_{vD} sur A : 20 μV pour 20 C, soit $e_A = 1 \mu V/ C$
 e_{vD} sur B : 28 μV pour 20 C, soit $e_B = 1,4 \mu V/ C$
 e_{vD} sur C : 54 μV pour 20 C, soit $e_C = 2,7 \mu V/ C$

	$e_{vD}/�C$ avant compensation	$m/�C(kg)$	$r_{ct} (\Omega)$	$l_{Fil} (m)$	$e/�C$ après compensation
A	$1 \mu V = 10^{-6}$	$1,87.10^{-3}$	0,075	$3,5.10^{-2}$	- 0,09 μV
B	$1,4 \mu V = 1,4.10^{-6}$	$2,62.10^{-3}$	0,105	$4,9.10^{-2}$	- 0,16 μV
C	$2,7 \mu V = 2,7.10^{-6}$	$5,05.10^{-3}$	0,200	$9,2.10^{-2}$	+ 0,20 μV

L'examen du tableau précédent nous permet de conclure que l'adjonction du fil de cuivre a permis de diviser par 10 environ les valeurs des dérives sans charges appliquées sur chaque capteur.

Le signe plus indique que la dérive se fait dans le même sens qu'un signal correspondant à une augmentation de charge sur un des capteurs.

Dérives du zéro, sans charge, résultant de l'association des trois capteurs montés en parallèle et alimentés sous 5 V.

Un capteur chargé par une masse de 1 g et alimenté par une tension de 5 V délivre un signal $e_v(\mu V) = \frac{5}{4} \cdot 5,36 = 0,67 \mu V$.

Nous montrerons (IV-E-1-b) que les trois capteurs branchés en parallèle délivrent un signal trois fois plus faible, soit $e_v = 0,22 \mu V/g$.

Quand la température augmente, si l'on admet que les variations de la tension de dérive pour la lame C correspondent à une augmentation, elles correspondent à une diminution pour les lames A et B.

L'association des trois capteurs réalise une troisième compensation.

La tension de dérive pour le montage à douze jauges actives vaut donc :

$$- \frac{0,09 - 0,16 + 0,20}{3} \cdot \frac{5}{4} \approx - 0,03 \mu\text{V}/^\circ\text{C}.$$

La dérive finale du montage sans charge est équivalente à une masse qui serait enlevée sur l'oxygénateur de $\frac{1\text{g} \cdot 0,03}{0,22} = 0,14 \text{ g}/^\circ\text{C}$ d'augmentation de température.

E - Montage des trois capteurs

1) Association des jauges

Nous avons conclu qu'un montage à quatre jauges par capteur, correctement disposées, assurait la meilleure compensation des dérives dues aux variations de température. Nous utilisons trois capteurs pour réaliser la pesée. Il faut donc associer douze jauges dans les meilleures conditions. Des solutions différentes peuvent être envisagées.

a) *Montage à 3 capteurs indépendants*

Il nécessite trois ponts d'extensométrie classiques.

Si chaque capteur associé à une chaîne délivre, sous la charge moyenne $\frac{P}{3}$ qui lui est appliquée (charge P uniformément répartie), une tension continue X, le signal résultant sous la charge P sera 3 X si l'on additionne les tensions continues à la sortie.

Les dérives du 0 et du signal de sortie sous charge avec les variations de température sont corrigées indépendamment sur chaque lame. Les sensibilités de chaque élément sont ajustées simplement par réglage du gain de l'amplificateur de chaque chaîne.

L'équilibrage en résistance et en capacité (s'il s'agit d'une chaîne à courant porteur sinusoïdal) est à réaliser sur les 3 ponts avant chaque mesure, ce qui nécessite 6 réglages pour faire le tarage.

On pourrait réunir ces 3 ponts d'extensométrie en un seul. L'alimentation se ferait à partir d'une tension stabilisée à travers 3 transformateurs.

3 équilibrages en résistance et en capacité seraient nécessaires ; 3 préamplificateurs permettraient d'ajuster les sensibilités. On n'utiliserait qu'un seul amplificateur et un système démodulateur, un filtre BF.

b) Montage en série ou en parallèle avec un pont d'extensométrie classique.

L'utilisation d'une chaîne de mesure impose un seul pont de Wheatstone de résistances.

Puisqu'on doit associer 12 jauges, il faut en placer 3 par branche. On peut disposer ces 3 jauges en série ou en parallèle.

- Montage en série (Fig. 18 A)

Tension de sortie dans la diagonale du pont : soient R_{1S} , R_{2S} , R_{3S} , R_{4S} les résistances équivalentes des branches 1, 2, 3 et 4.

$$R_{1S} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Pour un tel montage, d'après (5)

$$e_v = \frac{E_v}{4} \left(-\frac{\Delta R_{1S}}{R_{1S}} - \frac{\Delta R_{2S}}{R_{2S}} + \frac{\Delta R_{3S}}{R_{3S}} - \frac{\Delta R_{4S}}{R_{4S}} \right) \quad (23)$$

Comme précédemment, supposons que la charge moyenne $\frac{P}{3}$ soit appliquée à l'un des capteurs. On obtenait un signal X.

Que devient le signal dans le montage à 12 jauges ? Sous l'effet de la charge, les 4 résistances du capteur varient (R_1, R_4, R_7, R_{10}) - R_1 devient $R_1 + \Delta R_1$.

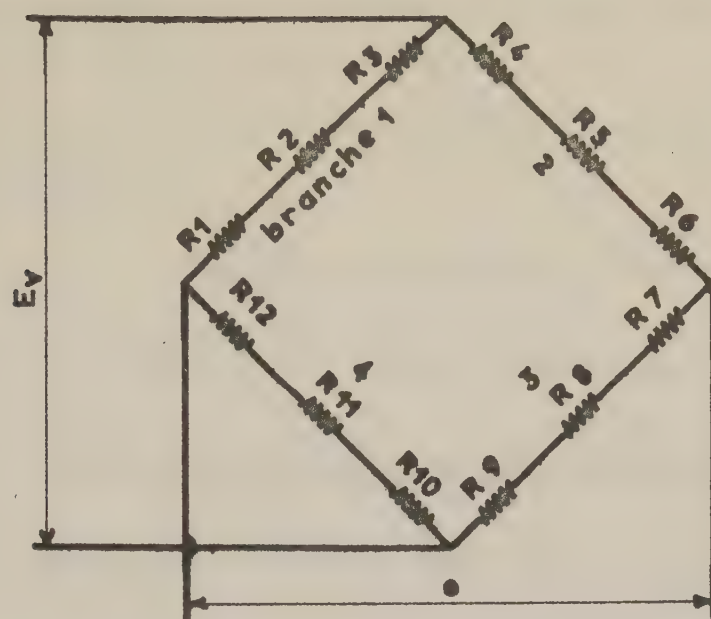
$$\text{Avec } R_{1S} = R_1 + R_2 + R_3, \quad \frac{\Delta R_{1S}}{R_{1S}} = \frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Les résistances des jauges ont la même valeur nominale

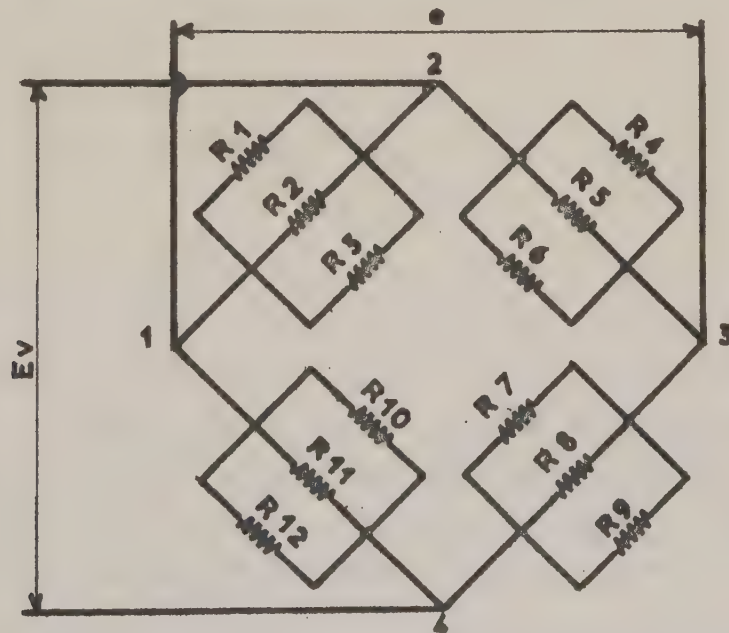
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_j \text{ donc } \frac{\Delta R_{1S}}{R_{1S}} = \frac{\Delta R_1}{3 R_j}$$

On montrerait de même que R_4, R_7, R_{10} créent des variations relatives des résistances des branches correspondantes égales au tiers de leurs propres variations relatives. Le signal de sortie e_v proportionnel à ces variations d'après (23) est donc également divisé par 3. Sa valeur devient $\frac{X}{3}$ pour une charge $\frac{P}{3}$ appliquée sur un capteur, soit X pour la charge P appliquée aux 3 éléments sensibles.

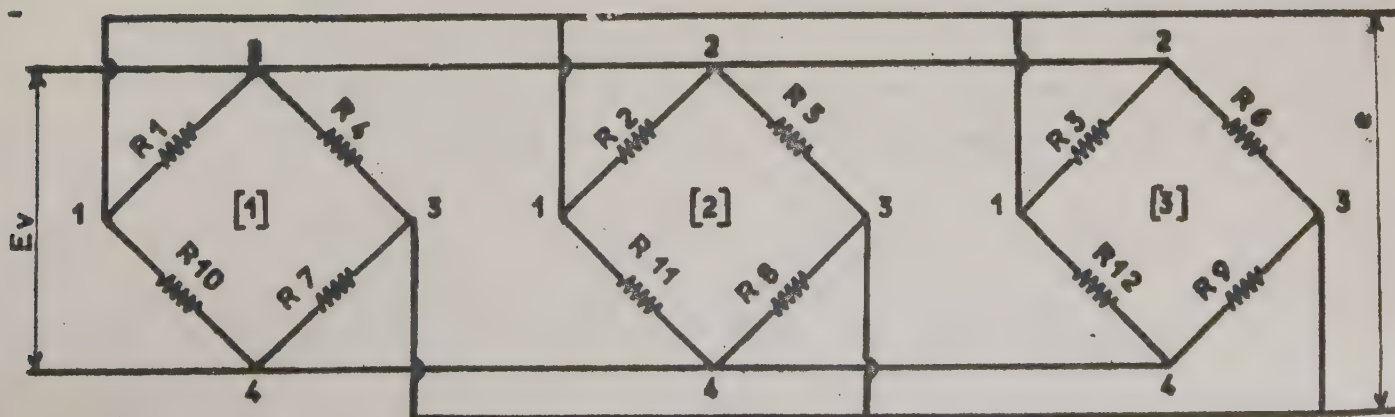
A - MONTAGE EN SERIE : 12 JAUGES ACTIVES



B - MONTAGE EN PARALLELE : 12 JAUGES ACTIVES



C -



Il faut remarquer que les 3 résistances situées sur une branche identique appartiennent à 3 capteurs différents. Les fils de liaisons seront donc longs et pourront créer des dérives.

Ce montage permet difficilement d'autre part d'égaliser les sensibilités des 3 capteurs.

- Montage en parallèle (Fig. 18 - BC)

Les figures (B) et (C) sont équivalentes.

Tension de sortie dans la diagonale du pont

Soit R_{lp} la résistance équivalente de la branche (1 - 2) :

$$\frac{1}{R_{lp}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad R_{lp} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}$$

Avec les mêmes hypothèses que dans le montage en série, on obtient :

$$\frac{\Delta R_{lp}}{R_{lp}} = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_1 (R_3 + R_2)}{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2} \text{ avec } R_1 = R_2 = R_3 = R_j$$

$$\frac{\Delta R_{lp}}{R_{lp}} = \frac{\Delta R_1}{3R_j}$$

De même R_4, R_7, R_{10} créent des variations relatives des résistances des branches dans lesquelles elles sont montées, égales aux tiers de leurs propres variations relatives. Comme dans le montage en série, le signal de sortie sera X pour la charge totale P appliquée aux trois éléments sensibles.

Cette disposition des jauges qui présente des avantages a été choisie : elle nécessite un seul pont d'extensométrie. Les ponts de Wheatstone 1, 2, 3 de la figure (18 C) sont collés et câblés indépendamment sur les éléments en U-Be 2 correspondants. Ils peuvent être étudiés, corrigés séparément.

La sensibilité de chaque capteur est ajustée facilement à celle du moins sensible.

Le montage global s'effectue en reliant par des fils en constantan et de façon symétrique les points 2 et 4 des ponts à 4 jauges d'une part, pour l'alimentation, et les points 1 et 3 d'autre part pour le signal de sortie X. (Fig. 19 B.)

2) Ajustage des sensibilités :

Nous avons montré (IV-A-1) que la tension qui apparaît dans la diagonale d'un pont de Wheatstone de jauges est proportionnelle à la tension d'alimentation.

En diminuant la tension d'alimentation par adjonction d'une résistance r_s , on pourra ajuster les sensibilités de deux des capteurs à celle du moins sensible (fig. 19 B).

Le montage global s'effectue en reliant par des fils en constantan et de façon symétrique respectivement les points 2 et 4 des ponts à quatre jauges aux fils A et B d'alimentation.

Résultats expérimentaux :

Les douze jauges sont câblées en trois ponts de Wheatstone montés en parallèle (fig. 19)

Une masse de 0,5 kg est appliquée alternativement sur chacun des trois capteurs par l'intermédiaire d'un crochet de suspension. (fig. 19 A)

Un voltmètre numérique branché sur la sortie "tension" du pont d'extensométrie comme pour les mesures de tensions de dérive avec la température, donne les indications suivantes :

LAME A : 680 mV

LAME B : 710 mV

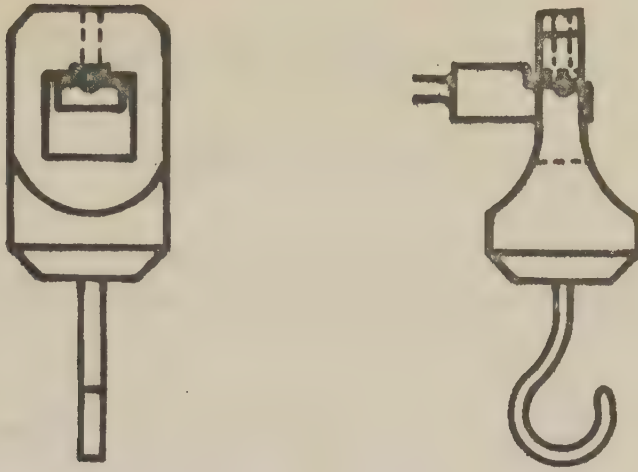
LAME C : 665 mV

C'est la lame C qui produit le signal le plus faible.

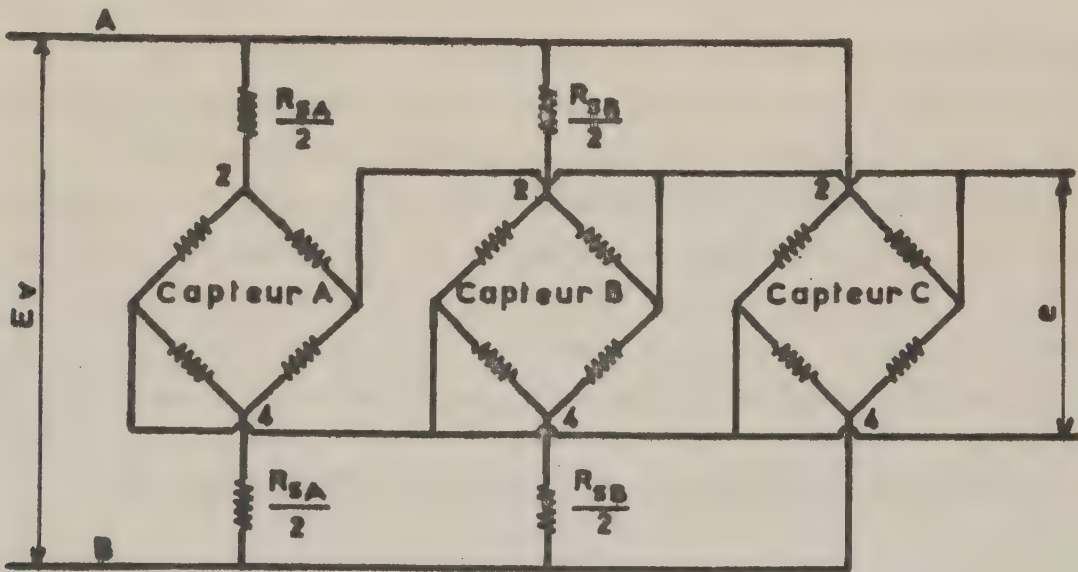
Il faut diminuer la tension d'alimentation de :

EQUILIBRAGE DES SENSIBILITES DES CAPTEURS .FIG19

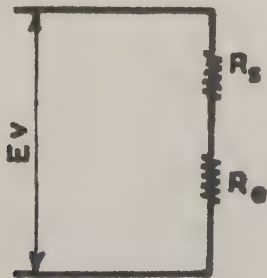
A _CROCHET DE SUSPENSION: monté alternativement sur chaque capteur .



B _POSITIONS DES RESISTANCES D'EQUILIBRAGE:



C _SCHEMA DE MONTAGE EQUIVALENT:



_ R_e : Résistance équivalente au pont de 4 jauges .

_ R_s : Résistance d'équilibrage des sensibilités .

$$\frac{680 - 665}{680} \cdot 100 = 2,2 \% \text{ pour la lame A}$$

et de 6,3 % pour la lame B.

Les valeurs de r_s sont donc : (fig. 19 C) puisque la résistance équivalente d'un pont de quatre jauges est de 300Ω ,

$$\frac{r_{SA}}{300 + r_{SA}} = 2,2 \% \text{ soit } \frac{r_{SA}}{2} = 3,35 \Omega$$

de même :

$$\frac{r_{SB}}{2} = 10 \Omega$$

Nous disposons de fil en constantan de 0,35 mm de diamètre de 5Ω par mètre. Pour la lame A nous avons utilisé 2 fois 0,67 m et pour B 2 fois 2 m.

Après ajustage expérimental des longueurs des fils, les sensibilités sont égalées au $1/1000e$; c'est-à-dire qu'une masse appliquée alternativement sur les trois capteurs à l'aide du crochet de suspension fournit un signal de sortie ne différant pas de plus de 1 digit pour une indication de 1000 digits.

Pour cette expérience le filtre monté entre le pont d'extensométrie et le voltmètre élimine les signaux alternatifs dus aux vibrations parasites.

3) Compensation de la variation de sensibilité du montage

Une première compensation des dérives des capteurs avec la température a été effectuée sans charge appliquée.

Sous l'effet d'une charge, la résistance d'une jauge longitudinale varie suivant la loi $\frac{dR}{R} = \kappa \cdot \frac{6 Fl}{Ebe^2}$

Le facteur K d'une jauge en constantan augmente avec la température alors que le module d'Young des métaux diminue.

Il en résulte un accroissement de $\frac{dR}{R}$, donc un accroissement de la sensibilité avec la température pour une force appliquée donnée.

Il faudra faire décroître la tension d'alimentation des capteurs progressivement avec les augmentations de température pour avoir :

$$e_v = \frac{E_{vo}}{4} \left(\sum \frac{dR}{R} \right)_{t_0} = \frac{E_{v1}}{4} \left(\sum \frac{dR}{R} \right)_{t_1}$$

(figure 19 B)

Le calcul de la résistance de compensation des variations de sensibilités est fourni par la société Vishay-Micromesures qui livre de telles résistances en nickel, de type ET - TG - AR222-012 de 7,5 mm x 7,5 mm de section.

Nous obtenons pour un pont de douze jauges, dont la résistance équivalente égale 100 Ω , une résistance de compensation en nickel pur (R_N) dont le coefficient de variation de résistance vaut $6,18.10^{-3}$, de 10 Ω sur du cuivre au béryllium.

Deux résistances du type précédent de 5 Ω sont montées dans les branches d'alimentation communes aux trois capteurs. Elles sont collées sur un corps d'épreuve pour avoir la même température que les jauges.

V - ESSAIS CLINIQUES - RESULTATS GLOBAUX

La sensibilité obtenue avec l'ensemble des éléments constitutifs de la chaîne de mesure (corps d'épreuve + Jauges, pont PR 9307, filtre) peut atteindre 0,5 g avec une tension d'alimentation de 5 V et avec une précharge (tare) dont la masse est comprise entre 0 et 30 kg.

La courbe signal de sortie du voltmètre en fonction des masses appliquées est linéaire. L'écart à la linéarité est inférieur à 0,2 % puisque le métal est utilisé au $\frac{1}{7}$ de sa limite élastique à 0,2 %. Ceci permet d'utiliser le système pour faire une pesée complète et de ne pas se restreindre à la pesée des variations.

En réalisant le tarage, on peut éliminer n'importe quelle précharge jusqu'à la portée nominale, et peser les masses ajoutées au retranchées avec la plus grande sensibilité.

Sans charge appliquée (dérives du 0), sans précautions particulières dans la salle de mesures (passages courants d'air) le signal de sortie en masse appliquée équivalente est stable à moins de $\pm 1g$ pendant 4 heures.

Sous charge, après tarage, dans les mêmes conditions, il est stable à moins de $\pm 3g$. (Période de préchauffage de l'ensemble d'une quinzaine de minutes).

Avec circulation d'eau dans l'oxygénateur et dans les tuyaux, en fixant rigidement ces derniers au bâti, on peut maintenir constante la masse de sang dans l'oxygénateur à ± 3 grammes.

Pour une vitesse de rotation des disques de 180 tours/mn, le filtre utilisé coupe les fréquences supérieures à 1 Hz.

Première série d'essais cliniques :

Elle a mis en évidence - la position trop haute de l'oxygénateur par suite de la surélévation créée par les corps d'épreuve.

- le mauvais positionnement du moteur sur le bâti par rapport à l'ensemble plateau-oxygénateur. Le flexible travaillait alors dans de mauvaises conditions (axe moteur et axe de l'oxygénateur décalés.

- La vitesse de rotation des disques en régime normal n'est pas de 180 t/mn mais de 100 t/mn. Ceci impose une fréquence de coupure de 0,5 Hz comme nous l'avons vu et non de 1 Hz.

- Les tuyaux étaient libres de se déplacer, nous pouvions noter les variations de poids parasites correspondant à ces mouvements.

Dans ces conditions, nous avons réglé la sensibilité de notre matériel sur la position 5g/digit. Malgré l'ajustage imparfait de la fréquence de coupure une précision de $\pm 5g$ était aisément atteinte.

Deuxième série d'essais cliniques :

L'ensemble est abaissé à l'aide d'un berceau soudé au châssis, sur lequel on fixe le socle supportant les capteurs. Dans cette position, le plateau est protégé des chocs éventuels, par le bâti.

On réduit les risques de déplacements longitudinaux en fixant deux tiges disposées transversalement sur le bâti.

La fréquence de coupure du filtre est ajustée à 0,5 Hz.

VI - ASSERVISSEMENT

A - Régulation de la masse d'oxygène contenue dans l'oxygénéateur

Manuellement, on annule tout écart par rapport à la valeur tarée en début d'opération en ajustant la résistance d'un potentiomètre qui commande le débit de la pompe.

Le schéma de la figure 20 montre que l'on conserve cette possibilité en fonctionnement automatique.

On réalise l'asservissement du débit de la pompe au signal de sortie du pont d'extensométrie, en utilisant :

1) une chaîne directe : d'amplification (amplificateur continu Rochar à gain réglable). Cet amplificateur alimente un servomoteur Birotax de type II monté avec une réduction de 150 comportant deux induits et dont l'un est moteur et l'autre sert de génératrice tachymétrique.

Le courant de démarrage maximum de ces moteurs est de 1 mA pour une résistance de 700 Ω , ceci correspond à une tension de 0,7 V.

Rappelons qu'une masse ajoutée de 1 g dans l'oxygénéateur crée un signal continu de 1 mV à la sortie du pont. Ce signal amplifié avec un gain de 1000 entraîne donc le moteur, et assure la régulation.

Le seuil d'asservissement correspond à une masse ajoutée ou retranchée de ± 1 g dans l'oxygénéateur.

Dans sa rotation, le moteur entraîne un potentiomètre double "type EUROFARAD 718" de résistance 10 k Ω pour chaque élément. L'axe de ce potentiomètre de 1800 spires, est monté sur roulements à billes (soit cinq spires par degré).

L'un des enroulements du potentiomètre sert pour la commande de la pompe et peut être utilisé manuellement. L'autre enroulement est monté dans la boucle de retour.

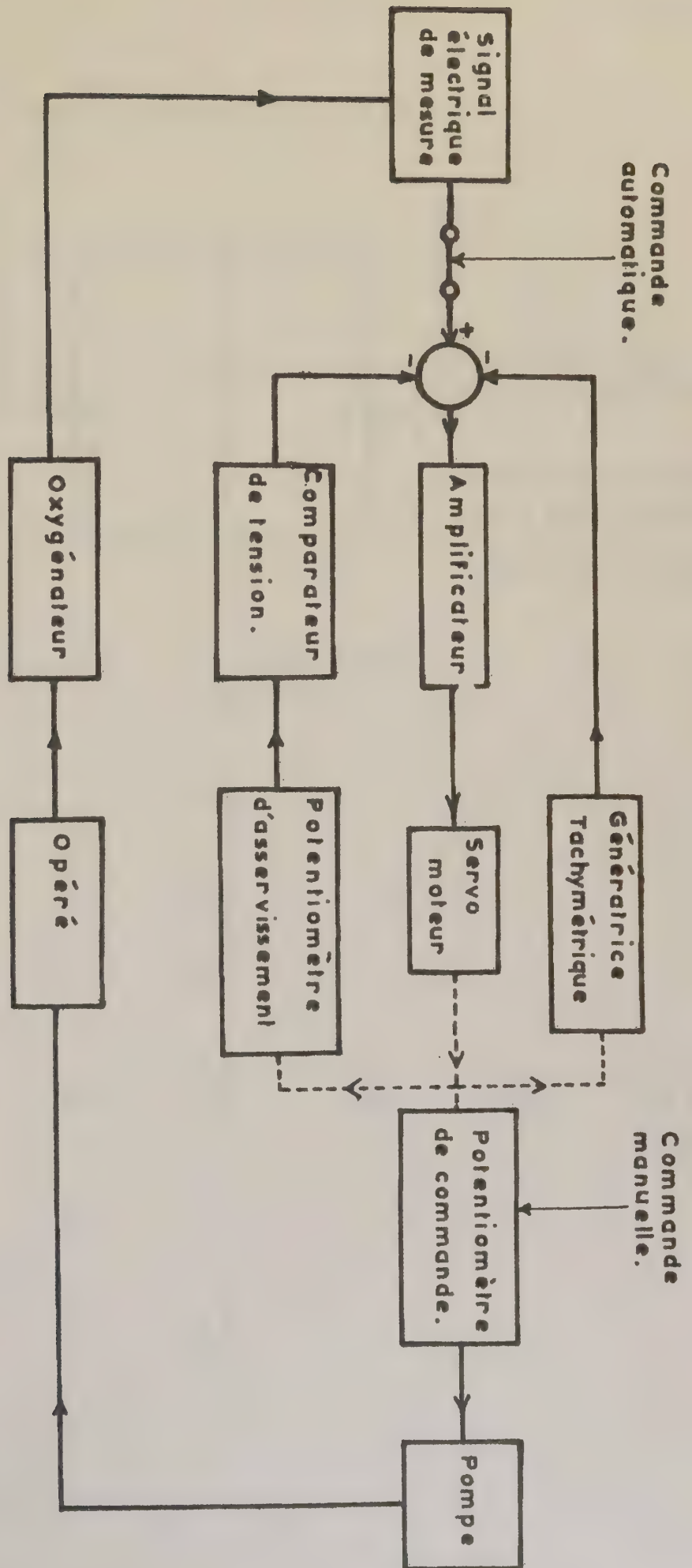
2) une boucle de retour

Le réseau régulateur comporte :

a) un pont détecteur d'écart ²⁴ qui réinjecte vers l'entrée une tension proportionnelle à l'écart

La tension de retour doit être nulle pour la position correspondant au tarage ; c'est-à-dire pour une tension de sortie du pont d'extensométrie nulle et une vitesse de rotation moyenne de 45 tours par minute. Cette vitesse

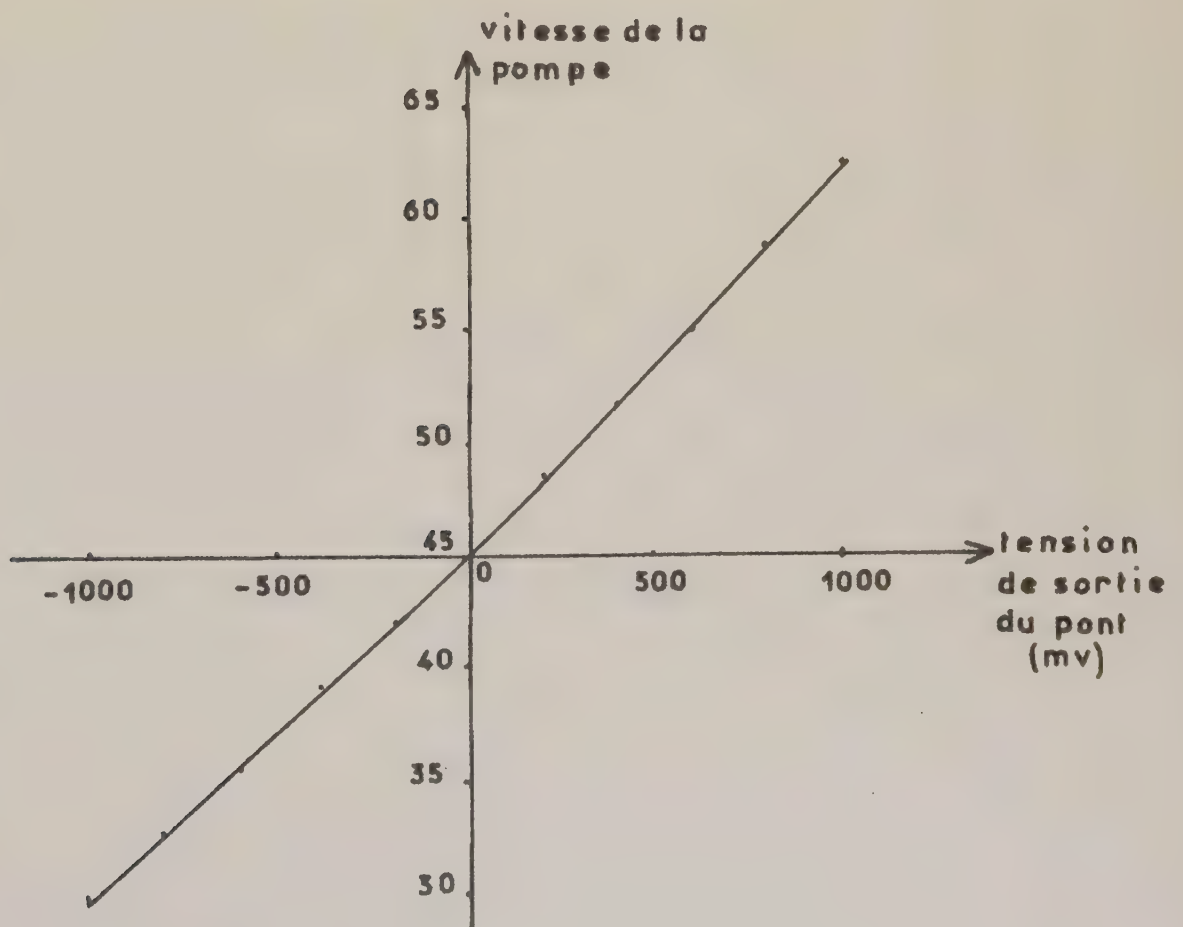
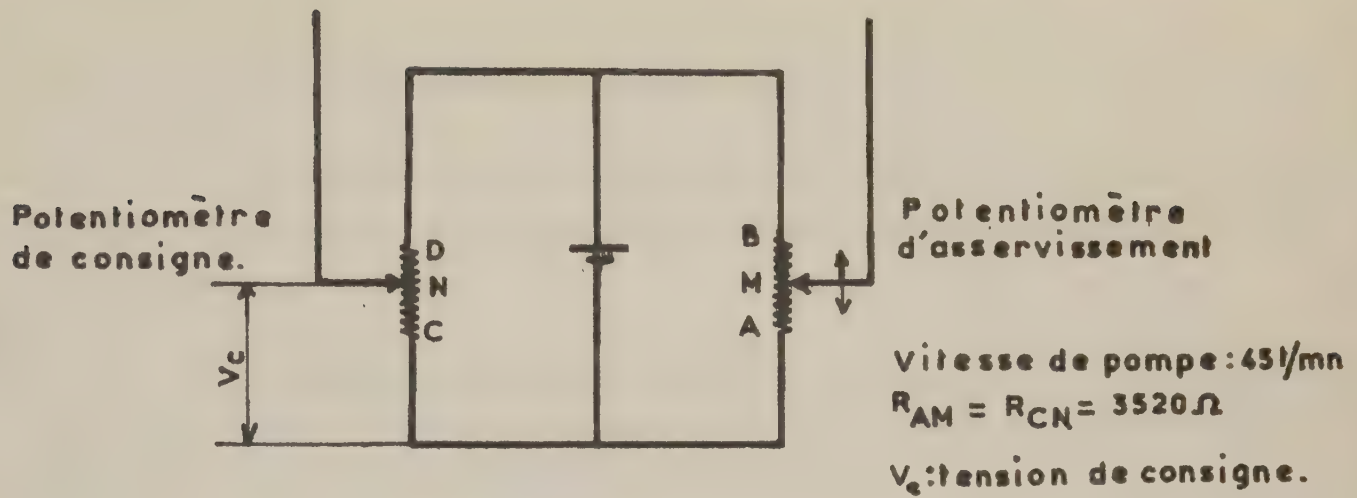
FIG 20



REGULATION DU POIDS DE SANG DANS L'OXYGENATEUR

FIG:21

PONT DETECTEUR D'ECART



est atteinte pour une résistance de $3520\ \Omega$ du potentiomètre de commande (ou d'asservissement puisqu'ils sont couplés).

Le schéma (21) montre le fonctionnement de ce comparateur de tension à partir d'une tension de référence réglable ²⁵

b) une génératrice tachymétrique qui modifie le signal de correction et agit en amortisseur en lui ajoutant une tension proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart.

Ce système de régulation crée une variation de vitesse de rotation de la pompe (donc du débit) qui est proportionnelle à la variation de la masse sanguine contenue dans l'oxygénateur. (figure 21)

VII - CONCLUSION

Nous venons de présenter un appareillage permettant d'une façon continue l'affichage numérique des variations de masse du sang dans un oxygénateur à disques avec une sensibilité de 0,5 g. Sous charge de 300 N (30 kgf), la précision maintenue pendant la durée d'une circulation extracorporelle est meilleure que ± 5 g.

On résorbe tout écart manuellement ou automatiquement.

Ces résultats ont été obtenus grâce à des précautions à la réalisation surtout en ce qui concerne - le métal choisi, les traitements thermiques effectués,
- l'usinage des lames, le collage des jauges
- les compensations effectuées.

Pour garder cette précision, à l'utilisation, les tuyaux d'arrivée et de départ du sang vers l'oxygénateur doivent être solidement fixés au bâti pour que leurs déplacements n'apportent pas de perturbations.

A la demande du chirurgien, on peut surcharger ou alléger la volémie du patient en pesant les quantités de sang déplacées. De même, on peut peser tout apport de liquide de l'extérieur vers l'oxygénateur.

Dans les systèmes "coeur-poumon" artificiels miniaturisés qui se développent actuellement en laboratoire pour les enfants, une pesée de l'ensemble extracorporel placé à une extrémité de la table d'opération peut parfaitement se concevoir compte tenu du faible encombrement des corps d'épreuve et de la bonne précision de la mesure.

Dans l'industrie, avec des ambiances plus sévères telles que vibrations variations de pression et de température extérieures, on peut utiliser notre appareillage robuste et sensible pour effectuer et contrôler une pesée.

Notations

- b : largeur de la partie active du corps d'épreuve à l'encastrement
(d) : point d'application de F.
 e : épaisseur de la lame
 e_v : tension aux bornes de la diagonale du pont de Wheatstone
 e_{vD} : tension de dérive apparaissant dans la diagonale du pont de Wheatstone
 E : Module d'Young du métal constituant le corps d'épreuve.
 E_v : tension d'alimentation du pont de Wheatstone.
 fd : flèche au point d'application de F.
 f_{st} : flèche statique du ressort sous une masse appliquée m .
 F : force appliquée au sommet de la lame triangulaire du corps d'épreuve.
 F_c : fréquence de coupure du filtre utilisé
 F_r : fréquence de vibrations de la lame
 G : impédance de la diagonale du pont de Wheatstone
 i_g : intensité du courant dans la diagonale du pont de Wheatstone
 I : moment d'inertie d'une section d'abscisse x par rapport à un axe horizontal passant par le centre de gravité.
 k : facteur de jauge
 k_r : constante de raideur du ressort
(L) : Lame en alliage cuivre-béryllium
 M : Moment fléchissant dans une section d'abscisse x
 n_x : contraintes normales dues à la flexion du corps d'épreuve
 P : puissance électrique dissipée par une jauge.
 r_{ct} : résistance de compensation
 R : résistance d'une jauge.
 R_i : ($i = 1, 2, 3, 4$) résistance de la branche i du pont de Wheatstone
 S : section d'abscisse x de la lame.
 T : effort tranchant dans S
 $U.Be2$: symbole A.F.N.O.R. du cuivre au béryllium
 v : distance du centre de gravité de S aux fibres extrêmes ($v = e/2$)

Notations (suite)

- α_c : coefficient de variation thermique $dR/Rdt^{\circ}C$
- α_f : coefficient de dilatation linéaire du fil de jauge
- α_m : coefficient de dilatation linéaire du métal sur lequel est collée la jauge.
- δ : Variation différentielle des résistances relatives de deux jauges, avant compensation par $^{\circ}C$.
- Δl_i : Variation de la longueur l_i de la grille de la résistance R_i ou de la longueur l_i du métal sur lequel elle est collée.
- ΔR : Variation de la résistance R
- $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ Allongement relatif de la longueur de la grille de jauge ou du métal sur lequel elle est collée
- ϵ_s : Allongement relatif résiduel
- 1 μD : (microdéformation) Allongement relatif $\epsilon = 10^{-6}$
- ν : Coefficient de Poisson du métal constituant le corps d'épreuve.
- ρ : Masse volumique du cuivre au béryllium
- ρ_f : Résistivité du fil de cuivre.

BIBLIOGRAPHIE

1. P.M. GALETTI et coll. Laboratory experience with long lasting perfusion
Transactions of American Society Artificial Internal
Organs. 1962, p. 57 à 63.
2. F. JOHN LEVIS et Coll. Semiautomatic control for an extracorporel blood
pump.
Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery
Mars 62. Vol. 43 N° 3, p. 392-395.
3. V.O. BJORK, F. INTONTI Clinical experience of a disc oxygenator with
et O. NORLANDER automatic blood level regulation.
Scandinav Journal Of Thoracic and Cardiovascular
Surgery, 1970, N° 4, p. 45 - 51.
4. J. HINGLAIS, P. PERONNEAU Asservissement d'une pompe d'assistance cardio-
J. Ch. AMBLARD circulatoire .
Centre d'études des techniques chirurgicales.
Hôpital Broussais, Paris, Documentation de chez
Marcel Dassault. 69.
5. MUSTARD, WT et Coll. Cardiovascular Surgery in the first year of life
Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery
1970. Vol. 59. p. 761.
6. Marko TURINO et Coll. An automatic cardiopulmonary bypass unit for use
in infants.
Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery
Février 72. Vol. 63. p. 262-268.
7. J. BEAUSSIER Le bruit aléatoire dans les chaînes de mesure
(of.national d'études et Revue française de mécanique
de recherches aérospa- 1965. N° 13, p. 69 - 73.
tiales)
8. M.C. FEVROT Ponts de mesure à courant porteur
(Ste. TELEC) Extensométrie, 1967, p. 39 - 58.
9. M. UGON Les chaînes de mesure à courant porteur alternatif
(Ets. Jules Richard) Principe, évolution, miniaturisation.
Mesures. Oct. 70. Vol. 35. N° 10, p. 99 - 108.

10. M. MICHEL
(Ets. Jules Richard) Instrumentation moderne en extensométrie
Mesures, Aout.Sept. 69, p. 82-91

11. A.B. AYLING A transistorized control unit for accurate gas
pressure with strain gauge pressure transducers.
Journal of Scientific Instruments
Sept. 67, N° 86, 1-5.

12. TIMOSHENKO Résistance des matériaux (Tome 1)
Librairie polytechnique Béranger. Département
technique des presses de la Cité, 1963.

13. P. RAPIN Conception, Réalisation et essais en cons-
truction mécanique.
Revue française de mécanique, 1971, N° 38, p. 34

14. H. BOUASSE Verges et plaques. Cloches et carillons
Bibliothèque Scientifique de l'ingénieur et du
physicien, 1927, (Delagrave) p. 118-123.

15. H. Salles Initiation à la théorie des vibrations mécaniques
Cours de l'I.N.S.A. 1963.

16. R. MATHEY Physique des vibrations mécaniques
1963. (Dunod) p. 74-79.

17. Société SCHENCK France 12, Villa Laugier. Paris (17e) Tel : 924.63.73.
Stage avec remise de documents.

18. Société Mitto-Mesures 7 Av Jean Jaurès F. 92. Malakoff. Tél. 655.38.83
Documents
Manuel d'analyse des contraintes (anciennement
édité par Budd)

19. Société Philips 105, rue de Paris, 93 - BOBIGNY Tél. 845.27.09.
Documents
Technique de mesures à l'aide des jauges de
contraintes. Bibliothèque Technique Philips
(Dunod) 1968.

- | | | |
|-----|--|--|
| 20. | Techniques de l'ingénieur | Mesures et Contrôles |
| 21. | Société H.B.M. | Mémento d'extensométrie (1971)
Société Schenck France voir 17. |
| 22. | U. ZELBSTSTEIN | Technique et utilisation des jauges de
de contraintes 1956, (Dunod) |
| 23. | Handbook of Chemistry and
Physics | By Chemical Rubler publishing company
Cleveland Ohio. Février 60. p. 2358.
distribué en France par Technique et
Documentation, 11, rue Lavoisier
Paris 8e. |
| 24. | C. DELACOTE | Régulation d'un débit liquide. Application
Circulation extra-corporelle.
Thèse de Docteur ingénieur I.G.B.M. 1972. |
| 25. | M. PELEGRIN
J.C. GILLE
P. DECAULNE | Les organes des systèmes asservis
1965. Dunod. |

